

自動車足回り用超高強度鋼板の溶接部の疲労強度向上

Improvement of Fatigue Strength of Arc Welded Joints Using High Strength Steel Sheets
for Automobile Chassis Members児玉 真二*
Shinji KODAMA石田 欽也
Yoshinari ISHIDA松田 和貴
Kazuki MATSUDA小川 正裕
Masahiro OGAWA

抄 録

自動車足回り部材の疲労強度向上を目的としたアーク溶接技術に関する直近の研究成果を述べた。先ず、溶接部疲労強度に及ぼす高強度溶接ワイヤ適用の効果について検討した。その結果、高強度ワイヤの適用で溶接金属の強度を増加させることで、溶接金属からの疲労き裂が抑制され疲労強度向上が可能になることを確認した。次に、疲労強度に及ぼす継手形式の影響として、引張荷重の疲労試験で重ね隅肉継手と突合せ継手の疲労強度を比較した。重ね隅肉継手に比べて突合せ継手の疲労強度が2倍以上増加することを確認する一方で、ルート部からき裂の生じる重ね隅肉継手および部分溶込みの突合せ継手では鋼板や溶接ワイヤの高強度化の効果が得られなかった。最後に、ルート部を含めた疲労強度向上対策として補剛ビードを提案し、重ね隅肉継手およびT字隅肉継手で応力集中低減効果および疲労強度向上効果を確認した。

Abstract

Recent research progresses on fatigue strength of arc welded joint using high tensile strength steel sheets are described, focusing on automotive chassis members. At first, effects of the high strength welding wire on fatigue strength were examined by bending fatigue test. As the result, it was confirmed that increasing of welded metal strength associated by the high strength wire suppresses the crack in welded metal around the toe portion, and improves the fatigue strength of welded joint. Secondly, comparison of fatigue strength between fillet lap joints and butt joints were studied by tensile load fatigue test. The fatigue strength of butt joint increases twice as high compared with its of fillet lap joint, while fillet lap joint and half penetration butt joint on which the root portion cracks generated could not obtain the effects of high strength welding wire. Finally, welded joints with the stiffening bead were proposed as a countermeasure for improving fatigue strength including root portion, and its potential for the stress reduction and the increasing of fatigue strength was indicated.

1. 緒 言

自動車分野では、CO₂排出量削減の観点から車体軽量化が必須の課題となっており、高強度鋼材の適用による板厚低減のニーズが高まっている。自動車の足回り部品には比較的板厚の厚い鋼板が用いられ、接合工法としてアーク溶接が適用されることが多い。その理由として、連続溶接であるために部材の強度、剛性が確保しやすいこと、閉断面構造の製作に適した片側アクセスが可能な接合法であること、鋼板間の隙間等に対する施工裕度が高いこと、母材の強度や成分に適した溶接ワイヤの選定ができることなど

が挙げられる。しかし、アーク溶接部は構造上必然的に応力が集中しやすい箇所となるため、走行時の繰返し負荷を受ける足回り部材においては溶接部が疲労き裂の起点になりやすい。

自動車のような薄鋼板溶接構造物の疲労強度に対する研究は、(公社)自動車技術会の疲労信頼性部門委員会¹⁾などで取り組まれており、自動車部材での使用頻度の高い継手の疲労強度をCAEにて予測する方法が検討されてきた。一方、溶接部の疲労強度を向上させる手段は、主に橋梁や造船等の分野で開発されており、厚板構造物においては圧縮残留応力を得るための超音波衝撃処理技術(UIT: Ultra

* 鉄鋼研究所 接合研究部 主幹研究員 工博 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

Sonic Impact Treatment)³⁾や低変態温度溶接材料⁴⁾が実用化されている。また、薄鋼板溶接継手のビード形状改善の観点から、鋼材成分および溶接ワイヤ成分に関する検討がされており、鋼材成分へのSi添加が溶接ビードの扁平化、アンダーカット防止に有効であることが報告されている⁵⁾。さらに、接合プロセスでも、なだらかな形状の溶接ビードを得るためのプロセスが開発されており、プラズマ・アークハイブリッド溶接技術⁶⁾や“MX-MIG”プロセス⁷⁾が、自動車向けの接合プロセスとして提案されている。

このように、自動車足回り部材におけるアーク溶接部の疲労強度の重要性は古くから認識されており、様々な対策技術が開発されてきた。しかしながら、現状の足回り部材に用いられる鋼板は440MPa級鋼板や590MPa級鋼板が主流⁸⁾であり、一部に780MPa級鋼板の適用が拡がりつつある状況である。ボディの骨格部材で1.2GPa冷間圧延鋼板や1.5GPaホットスタンプ鋼板が適用されている状況⁹⁾に比べると、適用鋼板の強度面での遅れが否めない。重要保安部材である足回り部材の超高強度化を推進するためには、従来にも増して信頼性の高い溶接部材を提供する必要がある。それを製造する溶接工程においては実際の製造工程に適合する手法を構築することが重要と考えられる。これらの背景を踏まえ、本報では自動車足回り部材アーク溶接部の疲労強度向上を目的に取り組んでいる。高強度溶接ワイヤ、および継手構造に関する最近の研究例をまとめる。

2. 高強度溶接ワイヤ適用による溶接部疲労強度向上

自動車足回り部材では440MPa～780MPa級の鋼板が使用されているが、一般的に、その組立に用いる溶接ワイヤには強度クラスが490MPa程度の軟鋼ワイヤが使用されることが多い⁸⁾。図1に、440MPa～980MPa級の鋼板を母材とした溶接継手の静的強度の例を示す。各々の鋼板に対して強度の異なる溶接ワイヤを用いて重ね隅肉継手を作製し、せん断引張試験を行っている。なお、継手強度は破断

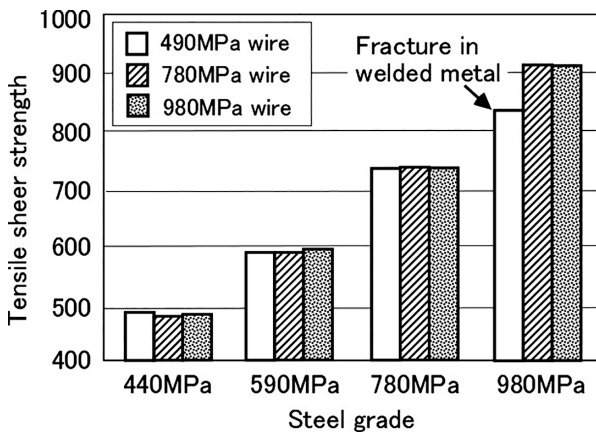


図1 薄鋼板アーク溶接継手の静的引張強度
Static strength of arc welded joints

荷重を母材の断面積で除した応力で表示している。図からわかるように、440MPa～780MPa級の鋼板であれば、490MPa級の軟鋼ワイヤを用いても同等の継手強度が得られることがわかる。また、980MPa級鋼において、780MPa級のワイヤで溶接金属破断を回避できている。一般的に1パス溶接で施工される薄鋼板アーク溶接では、溶接金属に母材成分が3～4割程度混入するとされ、母材の合金元素による溶接金属の強度増加が期待できる。このように、静的強度のみの観点では、鋼板強度に見合った高強度な溶接ワイヤを用いる必要性は乏しいといえる。

一方で、溶接部の疲労強度に対して高強度ワイヤの効果を検討した例はほとんどない。図2に足回り部材で多用される重ね隅肉継手の形状を示す。疲労き裂は溶接止端部およびルート部から生じるとされ、引張残留応力、応力集中係数、およびき裂発生部の強度が疲労強度に影響するとされる。しかし、前述の疲労強度向上策を含めこれまでの対策は、残留応力低減や応力集中低減を目的とした対策であり、疲労強度に及ぼす溶接金属の強度の影響に関してはほとんど検討されていない。そこで、高強度溶接ワイヤ適用による溶接部疲労強度向上の可能性について検討した¹⁰⁾。

供試鋼板は780MPa級熱間圧延鋼板(板厚2.3mm)で、溶接ワイヤには強度の異なる3種類のワイヤを使用した。表1に各々のワイヤの溶着金属成分および機械特性を示す。ワイヤA、Bは軟鋼用の溶接ワイヤ、ワイヤCは780MPa級鋼用のワイヤである。溶接方法はAr+20%CO₂シールドガスによるパルスマグ溶接とし、溶接電流190A、アーク電圧24.5V、溶接速度0.8m/minの条件とした。図3に疲労試験片の形状を示す。溶接止端部の疲労強度を両振り曲げ試験で求めるため、評価対象箇所の重ね隅肉溶接を行った後に、裏面側を拘束溶接しルート部の開口を防止し

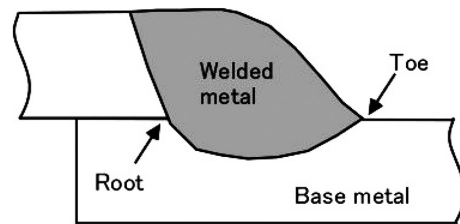


図2 重ね隅肉継手の形状
Configuration of fillet lap joint

表1 溶接ワイヤの特性
Properties of welding wire

Wire No.	Chemical compositions (mass%)				Mechanical properties		
	C	Si	Mn	Others	YP(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
Wire A	0.09	0.14	0.94	—	380	470	33
Wire B	0.07	0.61	1.21	—	460	570	30
Wire C	0.07	0.27	1.37	Ni, Cr, Mo	770	870	19

Results of deposit metals in Ar+20%CO₂ shielding gas
YP: Yield point, TS: Tensile strength, EL: Elongation

た。疲労試験は変位制御の曲げ疲労試験（応力比 $R=-1$ ）とし、繰返し周波数は 25Hz、試験終了条件は 40% のトルク低下もしくは、トルクの低下なしで繰返し数が 2×10^6 回に達した時とした。

図 4 に溶接部の断面マクロ写真を示す。いずれのワイヤを用いた場合でも溶接ビード形状の差はほとんどない。応力集中の原因となる止端部の曲率半径は 1mm 程度であり、この止端半径から推定される曲げ試験時の応力集中係数は 1.3 程度である。

図 5 に疲労試験結果を示す。溶接部の疲労強度がワイヤの高強度化、すなわち溶接金属強度の増加に伴って増加することがわかる。ワイヤ A の疲労限が 210MPa であるのに対しワイヤ C では 280MPa となり、ワイヤの高強度化により約 30% の疲労強度向上効果が得られた。

き裂発生挙動に及ぼす溶接金属強度影響を調査するため、疲労破断後の溶接部断面を観察した。図 6 にき裂発生後の溶接部の断面写真を示す。マクロ観察では、いずれの試験片も溶接止端部、すなわち溶融境界部からき裂が発生

しているように見えるが、き裂部を拡大して観察すると、ワイヤ A、B では溶接金属内からき裂が発生するのに対し、強度の高いワイヤ C を用いた場合は止端部近傍の溶接熱影響部 (HAZ: Heat Affected Zone) からき裂が生じていることがわかる。観察した断面はき裂発生の起点ではなく、伝播した部位であるかも知れないため結論付けることはできないが、高強度ワイヤ適用による溶接金属の高強度化でき裂発生部の繰返し塑性化が抑制され溶接継手の疲労強度を向上させた可能性が考えられる。

なお、溶接金属からき裂が発生しやすい理由に関しては、溶接止端部形状として整理されるマクロ的な形状だけでなく、溶接ビード表面の微小な凹凸が影響すると考えられる¹¹⁾。図 7 は疲労試験後の溶接ビード表面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察したものであるが、リップルと呼ばれる溶接ビードの波目模様に沿ってき裂が発生していることがわかる。このように、溶接部の疲労現象を深く理解するためには、より微視的な視点での解析が重要と考えられる。

これまで、溶接部疲労強度の向上手段として高強度溶接ワイヤの効果について述べた。従来知見では、鋼材や溶接ワイヤの強度が増加しても溶接部の疲労強度は増加しないとされてきたが、薄鋼板の溶接継手ではき裂発生部の高強度化が疲労強度向上に有効である可能性が示された。この

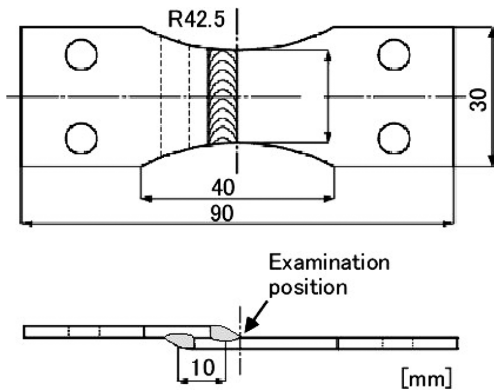


図 3 疲労試験片の形状
Configuration of fatigue test specimen

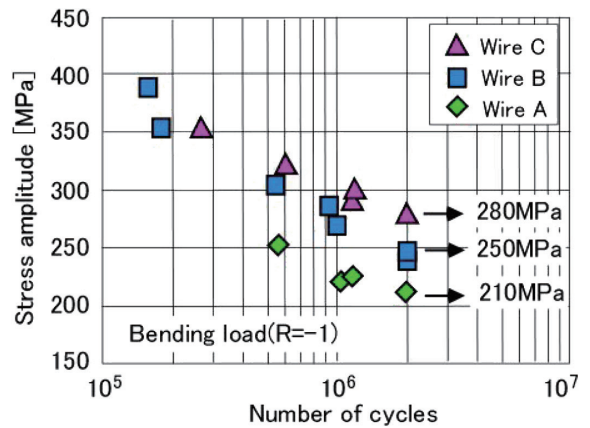


図 5 疲労試験結果
Results of fatigue test

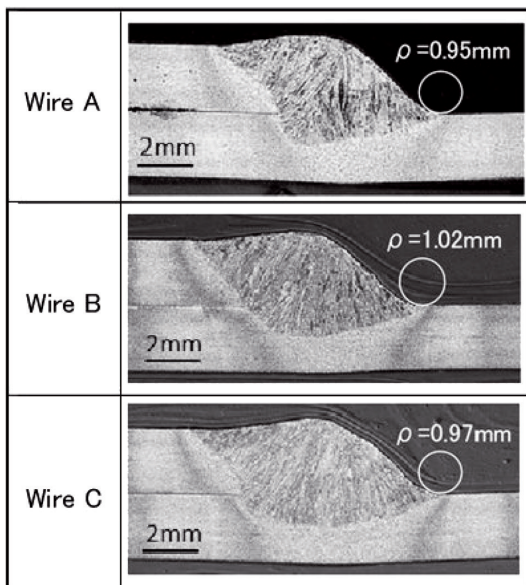


図 4 溶接部の断面マクロ写真
Cross sections of welded part

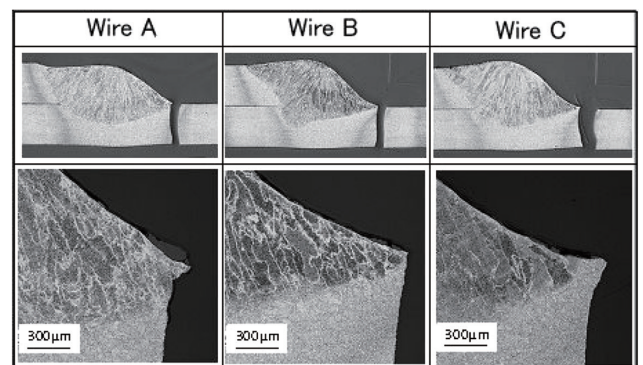


図 6 き裂発生後の溶接部の断面写真
Cross sections of fractured specimen

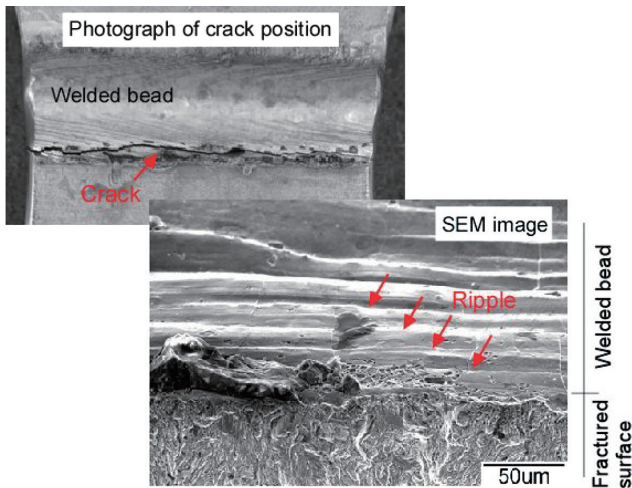


図7 溶接ビードの微小凹凸からの疲労き裂
Fatigue crack from micro irregularities in welded bead

要因として、薄鋼板継手では板厚低減効果によりに構造的な応力集中が小さくなること、面外変形が比較的容易なため残留応力が小さいことが考えられる。このため、応力集中のばらつきを低減できる安定した形状の溶接ビードを維持できれば、鋼板や溶接ワイヤの強度増加とともに疲労強度も高くなると考えられる。なお、本評価では溶接止端部からのき裂を前提とした試験を行ったが、実部材では様々な溶接位置からき裂が発生することも想定される。このため、実部材での性能把握が不可欠である。

3. 疲労強度に及ぼす継手形式の影響

自動車足回り部材では、溶接時の施工安定性や部材のプレス成型時の形状ばらつきの観点から重ね隅肉継手が多用されている。このため、前章でも述べたように、溶接部の疲労強度は重ね隅肉継手で評価される場合が多い。しかしながら、重ね隅肉継手に荷重が加わると、板厚中心のずれ

により溶接部に作用する構造的な応力集中係数が増加する。これに対し、突合せ継手では溶接部の応力集中も緩和され疲労強度が向上すると予想される。そこで本章では、軸力方向に荷重を負荷する引張疲労試験にて重ね隅肉継手と突合せ継手の疲労強度を比較した¹²⁾。

鋼板として板厚 2.6mm の 440MPa 級および 780MPa 級熱間圧延鋼板を、溶接ワイヤとして 490MPa 級 (Wire B) および 780MPa 級 (Wire C) を採用した。なお、各々の溶接ワイヤは表 1 に示すワイヤと同一である。突合せ継手では、完全溶込みと部分溶込みの 2 水準の継手を作製した。実部材の製造において完全溶込みの突合せ継手を安定して作製することは困難と予想されるため、施工ばらつきの観点から板厚の 1/2 の溶込み深さを有する部分溶込み試験片を評価に加えた。

溶接試験体から JIS 13 号 B 試験片を採取し試験に供した。疲労試験は荷重制御の引張疲労試験 (応力比 $R=0.1$) とし、繰返し速度は 25Hz、試験終了条件は破断もしくは繰返し回数が 2×10^6 回に達した時とした。

図 8 に疲労破断後の試験片断面写真の例を示す。前章の曲げ疲労試験結果と異なり、重ね隅肉溶接継手ではルート部からき裂が発生し、溶接金属内を板厚方向に進展した。また、部分溶込み継手では鋼板突合せ面の溶込み底部からき裂が発生し、溶接金属内をき裂が進展した。一方、完全溶込み継手の場合は溶接裏面の止端部でき裂が発生し、HAZ にき裂が進展した。なお、重ね隅肉継手において 440MPa 鋼/490MPa 級ワイヤの組合せでは止端部にもき裂が観察されたが、780MPa 鋼/780MPa 級ワイヤの組合せでは止端部のき裂が確認されなかった。

図 9 に疲労試験結果を示す。440MPa 鋼に 490MPa 級および 780MPa 級ワイヤを用いた場合、780MPa 鋼に 780MPa 級ワイヤを用いた場合を示している。440MPa 鋼の結果を

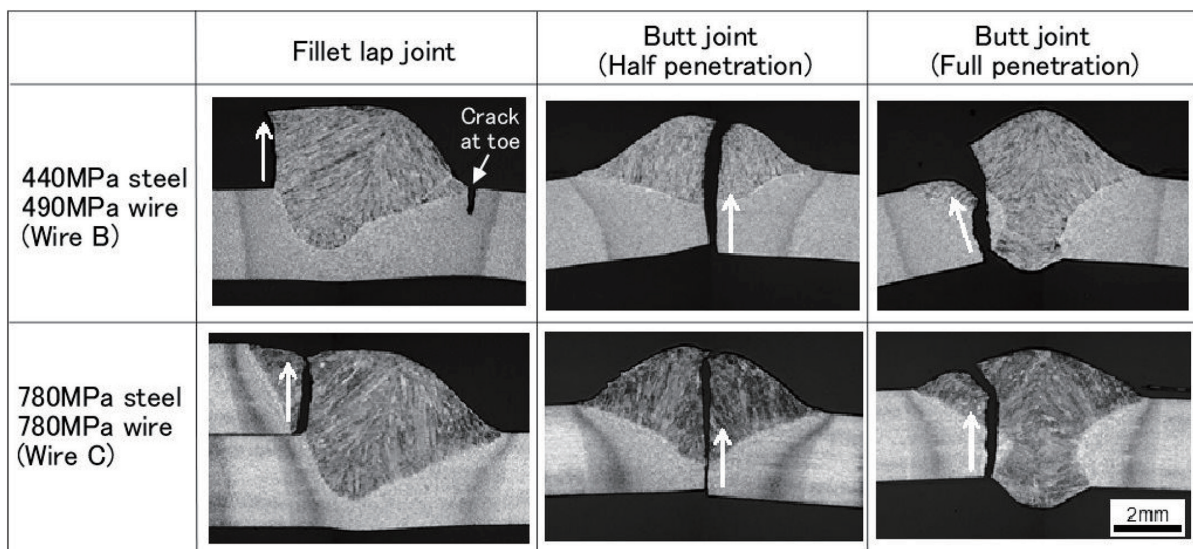


図8 疲労破断後の試験片断面写真
Cross sections of fractured specimens

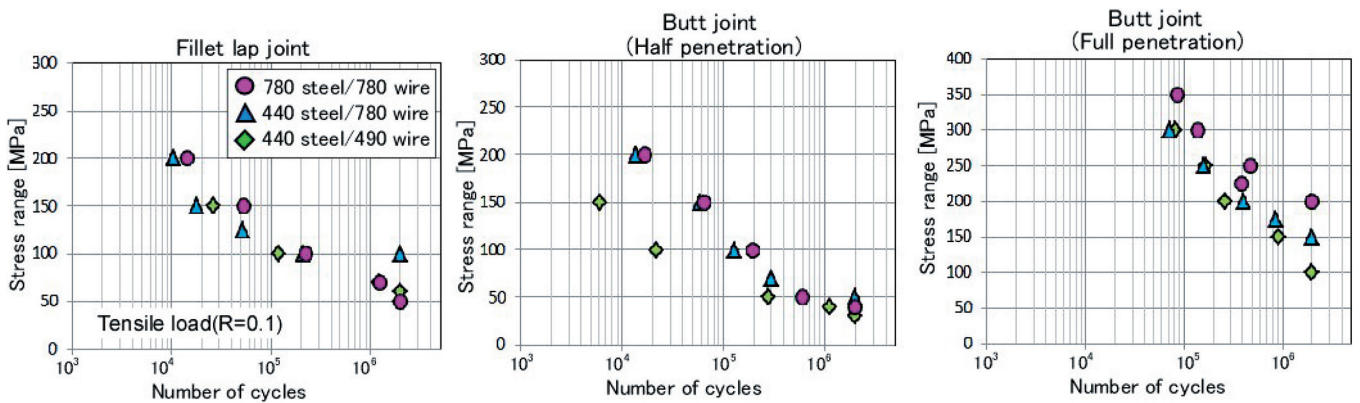


図9 引張疲労試験結果
Results of fatigue test in tensile loading

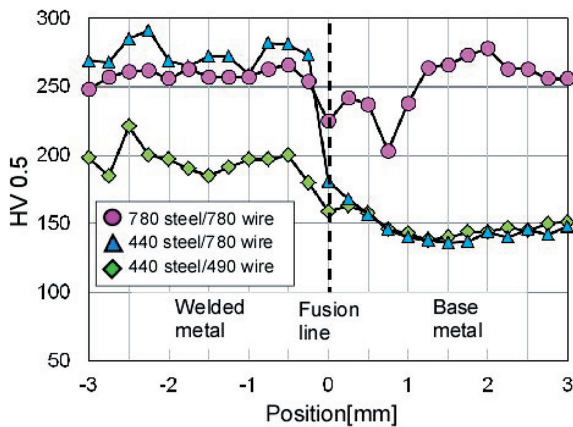


図10 完全溶込み継手の硬さ分布
Vickers hardness distributions of welded joint

見ると、部分溶込み溶接継手と重ね隅肉溶接継手の疲労強度はほぼ同等であったが、完全溶込み溶接継手の疲労強度はそれらの2.5~3倍の値を示した。施工ばらつきを想定した部分溶込み継手においても重ね隅肉継手と同等の疲労強度が得られること、完全溶込み継手にて良好な疲労強度が得られることから、突合せ継手は溶接部疲労強度に対して有効な継手形式であることがわかる。

一方で、鋼板および溶接ワイヤの影響を比較すると、重ね隅肉継手および部分溶込み継手は鋼板および溶接ワイヤの種類によらずほぼ同一のSN (Stress amplitude Number of cycles) 特性を示すが、完全溶込み継手は高強度化することで疲労強度が向上することがわかる。図10に完全溶込み継手の硬さ分布を示すが、鋼板および溶接ワイヤの高強度化で止端部に相当する溶融境界部の硬さが増加しており、止端部からき裂が生じる場合はき裂発生部の高強度化が疲労強度向上に有効であるといえる。これは、前章の結果とも合致する。

一方で、ルート部からき裂が発生する場合は、鋼板および溶接ワイヤを高強度化しても疲労強度向上の効果が得られなかった。そこで、継手の断面形状をもとに各種の継手を再現し、2次元FE解析を行った。母材、溶接部を含めた全てを均質な材料とし、ヤング率206000MPa、ポアソン

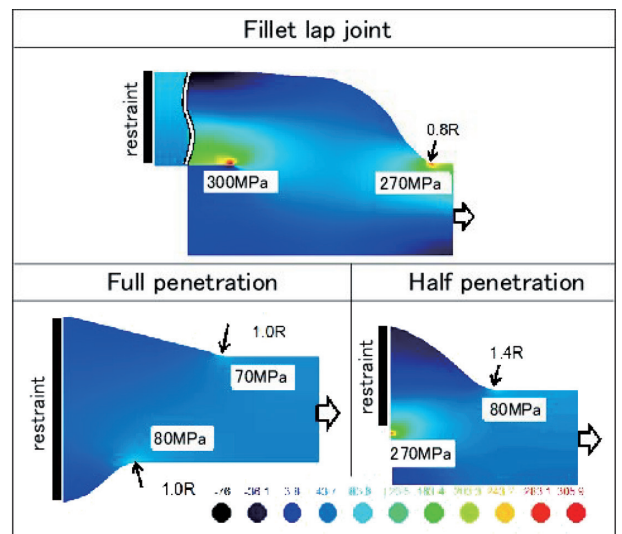


図11 引張方向応力分布のFE解析
Estimated stress along load direction in welded joint

比0.3を与え、鋼板端部に50MPaの引張载荷した場合の応力状態を解析した。図11に引張荷重方向の応力分布を示す。応力集中部は各々の継手の破断位置と一致することが確認できる。また、荷重方向の最大応力は、重ね隅肉継手はルート部の306MPa、完全溶込み継手は裏面止端部の84MPa、部分溶込み継手では鋼板突合せ部の270MPaであった。重ね隅肉継手、部分溶込み継手のき裂発生部は、完全溶込み継手に比べて最大応力が3倍ほど高く、疲労強度低下の度合いと概ね一致した。

ここでは、疲労強度に及ぼす継手形式の影響について述べた。その結果、重ね隅肉継手に対し、突合せ継手は疲労強度の観点で極めて有効であることが確認された。しかし、突合せ継手を現状のアーカ溶接にて安定して製造するのは困難であるため、今後、部材精度向上のための成形技術やレーザアーカハイブリッド溶接等の接合プロセス等の総合的な検討が期待される。一方で、ルート部からき裂が生じる場合は、鋼板や溶接ワイヤを高強度化しても疲労強度向上の効果が得られなかった。その理由として、ルート部は止端部に比べて応力集中係数が極めて高いこと、またき裂

の発生、進展が溶接金属主体になることが考えられる。現状では、ルート部の疲労特性に関する十分な検討ができておらず、今後の詳細な解析が必要である。

4. 補剛ビードによる溶接部疲労強度向上

4.1 重ね隅肉継手での検討

前章にて、ルート部からき裂が発生する場合の疲労強度を評価した。一般的に、自動車足回り部材ではルート部からの疲労き裂を回避するように設計されており、また、これまでの溶接部疲労強度向上に関する検討も止端部からのき裂を想定した対策がほとんどである。しかしながら、ますます厳しくなる鋼板の薄肉化要求に応え続けるためには、ルート部を含めた溶接部疲労強度向上の手段も重要と考えられる。

図12に重ね隅肉継手に軸力方向の荷重を負荷した場合の応力分布および変形状態を示す。なお、板厚方向の変位を拡大して表示し、変形状態を見やすくしている。載荷に伴い溶接部に回転変形が生じて応力集中係数が増加することがわかる。また、継手形状のばらつきを想定して鋼板間に隙間を設けた場合は、回転変形がより大きくなり、特にルート部の応力集中係数が増加することがわかる。このため、載荷時の回転変形を抑制できればルート部を含めた溶接部の疲労強度向上が可能になると考えた。そこで、溶接線に直行するビード（以下、補剛ビードと呼ぶ）を付加的に

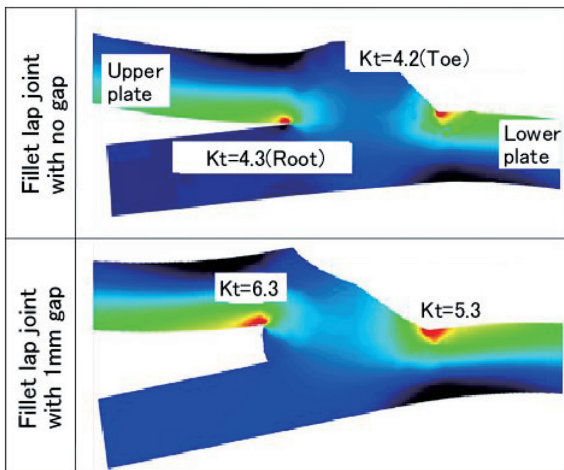


図12 重ね隅肉継手の荷重方向の応力分布
Stress distributions along loading direction in fillet lap joint

配置し、疲労強度に及ぼす影響を評価した¹³⁾。

供試鋼板は熱間圧延鋼板 SPH440 (板厚 2.6mm) とし、490MPa 鋼用の溶接ワイヤを用いたパルスマグ溶接で重ね隅肉継手を作製した。継手形状を図13に示す。鋼板重ね部の隙間を 0mm, 1mm に設定し、60mm 幅の鋼板の中央に 45mm 長さの隅肉ビードを配置した。補剛ビードとしては図14に示す3種類の配置を比較した。(a) 下板補剛は、隅肉ビードを起点に下板に向かってビードを配置したものであり、補剛ビードの長さは 50mm とした。(b) 上板補剛は、隅肉ビードから上板に向かってビードを配置したものである。(c) H 形補剛は、隅肉ビードの始端と終端に重なるようにビードを配置したものであり、補剛ビードの長さはそれぞれ 25mm とした。なお、溶接開始端部は凸ビードになりやすく、そこでの応力集中増加が懸念されるため、下板補剛、上板補剛に対しては溶接開始位置を隅肉ビード上とし、鋼板側に形状のなだらかなクレータ部が配置されるように溶接した。

これらの試験片を用いて疲労試験を実施した。疲労試験は荷重制御の引張疲労試験（応力比 $R=0.1$ ）とし、試験終了条件は破断もしくは繰返し回数が 2×10^6 回に達した時とした。図15に疲労試験後の試験片外観写真の例を示す。いずれの試験片においても破断位置は隅肉ビードの止端部またはルート部であり補剛ビードそのものがき裂の起点となることはなかった。鋼板間隙間が 0mm の場合、補剛ビードなしでは止端部破断であったが、下板補剛でき裂がなくなり、上板補剛では止端部破断、H 形補剛ではルート破断となり、様々な破断形態に変化した。一方、鋼板間に 1mm の隙間を設けた場合は、隅肉ビードの有無によらずルート

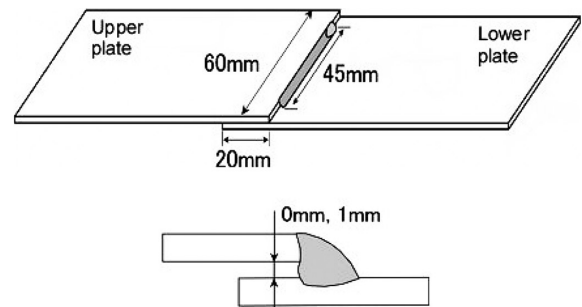


図13 疲労試験の形状
Configuration of fatigue test specimens

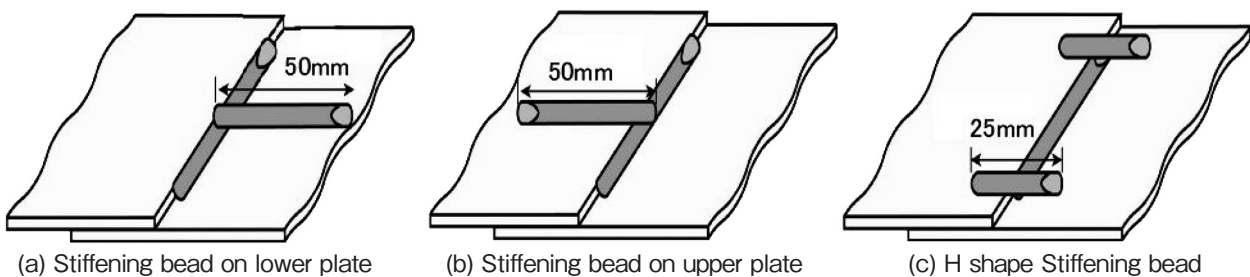


図14 補剛ビードの配置
Configurations of stiffening beads

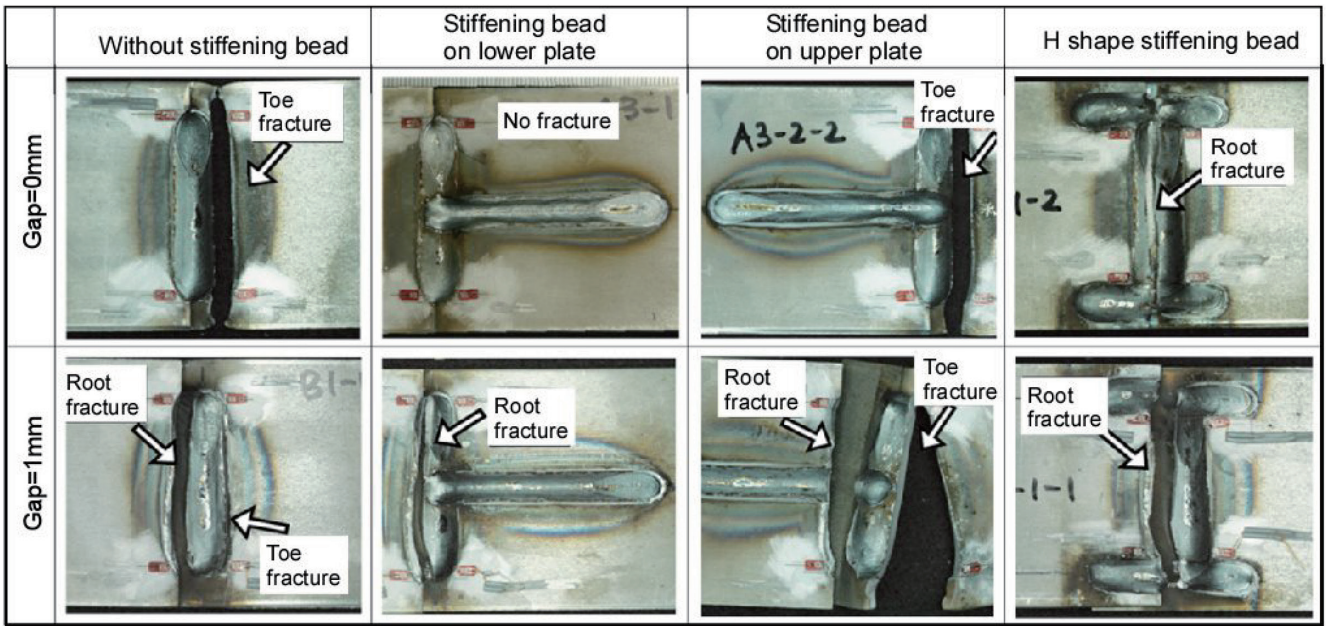


図 15 疲労試験後の試験片外観写真
Appearances of fractured specimens

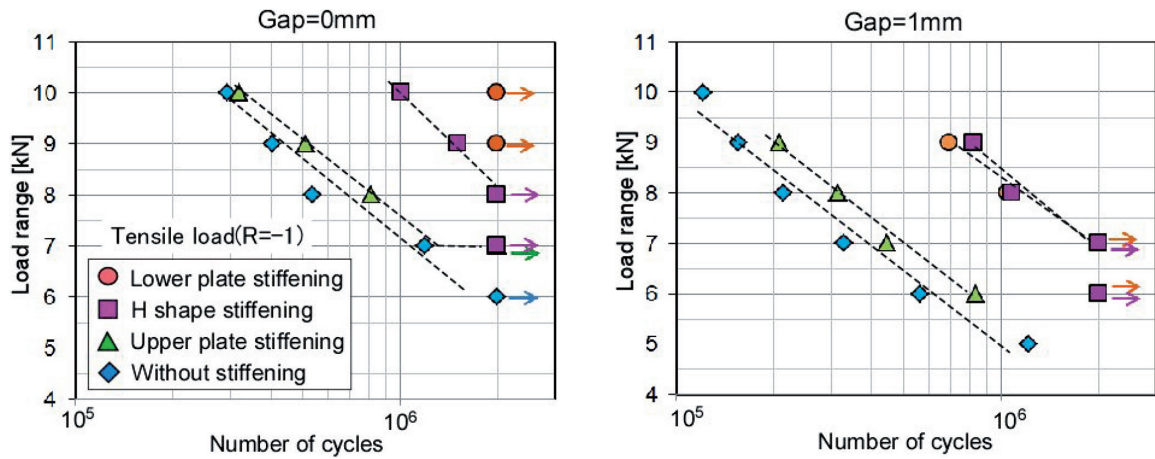


図 16 疲労試験結果
Results of fatigue test

部からの破断が確認された。図 12 に示すように鋼板間の隙間がルート部の応力集中係数を高めていることが示唆される。

図 16 に疲労試験結果を示す。鋼板間隙間が 0mm の結果をみると、補剛なしの隅肉ビードのみに対し、上板補剛はわずかに時間強度が上昇するものの、その効果は小さかった。これに対し、H 形補剛および下板補剛は疲労強度を大きく上昇させることがわかる。特に、下板補剛はこの荷重範囲では破断しておらず、隅肉ビードのみの継手に対して疲労寿命で約 5 倍、200 万回疲労強度で約 2 倍の向上効果が得られた。また、鋼板間隙間が 1mm の場合の結果では、いずれの継手においても隙間の存在による疲労強度の低下が確認されたが、補剛ビードの効果として下板補剛および H 形補剛が有効であることが確認できた。

各々の補剛ビードにおける疲労強度向上の効果を相対的

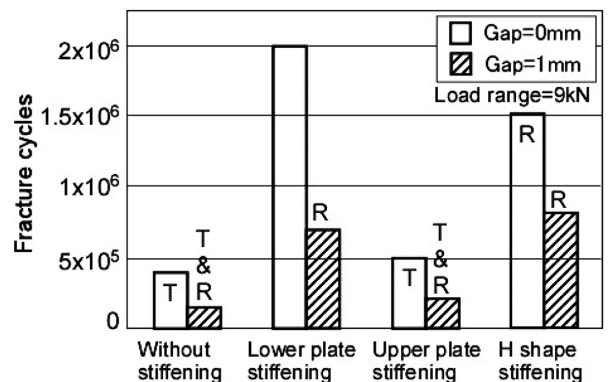


図 17 破断寿命の比較
Comparison of fracture cycles

に比較するため、図 17 に荷重振幅 $\Delta P=9\text{kN}$ の場合の、破断寿命と破断位置をまとめる。図中の“T”は止端部破断，“R”はルート破断，“T&R”は各々が混在していたことを示

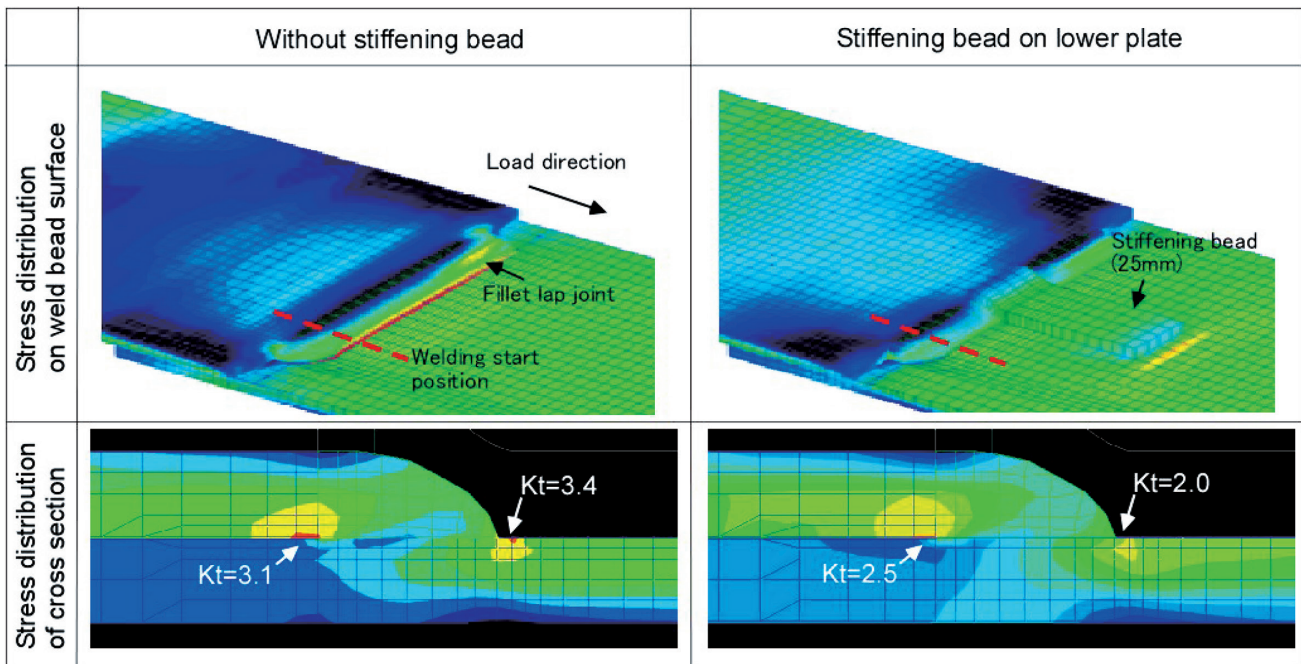


図 18 補剛ビードによる応力低減効果
Effect of stress reduction by stiffening bead

す。隙間 0mm の場合、隅肉ビードに対して下板補剛は 5 倍超、H 型補剛は 3.5 倍の疲労寿命延長効果を示した。一方、隙間が 1mm になると、相対的に破断寿命は低下するものの、下板補剛、H 形補剛各々で 4 倍、5 倍に疲労寿命が増加した。実施工では鋼板間に隙間が生じることが多いと考えられるため、隙間 1mm で良好な結果となった下板補剛および H 形補剛が有用であると考えられる。

図 18 は補剛ビードの効果を確かめるために行った FE 解析の結果で、下板補剛を配置した場合の引張方向の応力分布を示している。図 12 と同様に、母材、溶接部を含めた全てを均質な材料とし、ヤング率 206000 MPa、ポアソン比 0.3 を与え、鋼板端部に 50MPa の引張载荷した場合の荷重方向の応力分布を解析した。補剛ビードの有無で溶接ビード表面の応力分布を比較すると、補剛ビードの配置によって隅肉溶接止端部の応力が低下していることがわかる。

また、疲労き裂の発生しやすい溶接開始部の断面における応力分布をみると、補剛ビードによって止端部およびルート部ともに応力集中係数が低下していることがわかる。ここでの解析では、補剛ビード長さを 25mm と実験で用いた補剛ビードの 50mm の半分の長さであるため、応力集中低減の効果は小さいと考えられるが、定性的には補剛ビードの有効性を示していると考えられる。なお、上板補剛で疲労強度向上効果が得られなかったこと、H 形補剛における溶接始末端補強の効果については十分な解析ができていないため、今後の課題として残る。

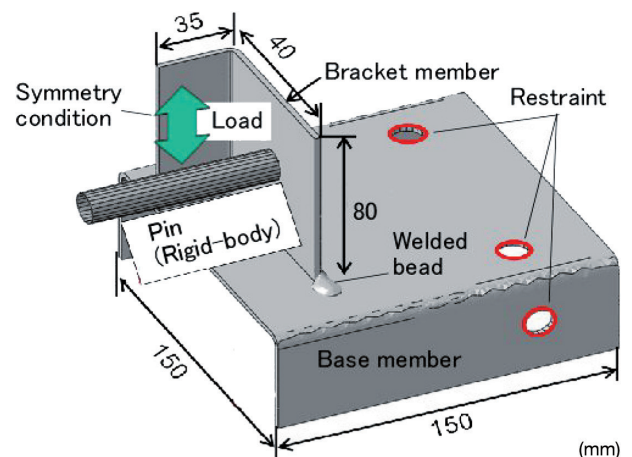


図 19 T 字隅肉溶接部材の解析モデル
Simulation model of T shape fillet joint

4.2 T 字隅肉継手での検討

重ね隅肉継手における補剛ビードの知見をもとに、実部材に近い T 字隅肉継手で補剛ビードの効果を検討した¹⁴⁾。対象部材には、自動車での代表的なアーク溶接継手¹⁵⁾を念頭に、ハット状のベース部材にブラケットを T 字継手で溶接する構造を採用した。疲労試験では、門型の治具にてベース部材を固定し、T 字隅肉溶接したブラケットに鉛直方向に繰返し負荷した。図 19 に解析モデルおよび拘束条件を示す。解析領域は対称性を考慮した 1/2 モデルのベース部材、ブラケット部材および载荷用ピンの部分である。また、ブラケット、ベース部材は縦弾性係数が 205800 MPa、ポアソン比が 0.3 の弾性体とし、载荷用ピンは剛体とした。

ブラケットとベース部材間の溶接ビード形状は、実際の

溶接部の断面マクロ写真をもとに作製した。疲労き裂はブラケット端部の溶接ビードから発生する。このため、図 20 に示すような詳細な溶接断面観察を通じて、実際の溶接ビード形状を忠実に再現するように心がけた。

疲労試験および FE 解析にて、補剛ビードを配置しない場合（基準形状）と、ブラケット先端部の隅肉ビード部に補剛ビードを配置する場合を比較した。図 21 に、疲労試験後のき裂発生位置と、上方向に荷重を載荷した場合のシミュレーションでの最大主応力分布を示す。基準形状では、ブラケットの端面付近の隅肉ビード（図中(A)）で最大主応力が高くなり、き裂発生位置と一致していることが確認できる。また、補剛ビードを配置した場合は、基準形状での応力集中部での最大主応力は小さくなり、接合部先端付近（図中(B)）の応力のほうが大きくなる。疲労試験におけるき裂発生位置も隅肉ビード先端付近を回るように生じており、解析結果の傾向と一致することがわかる。

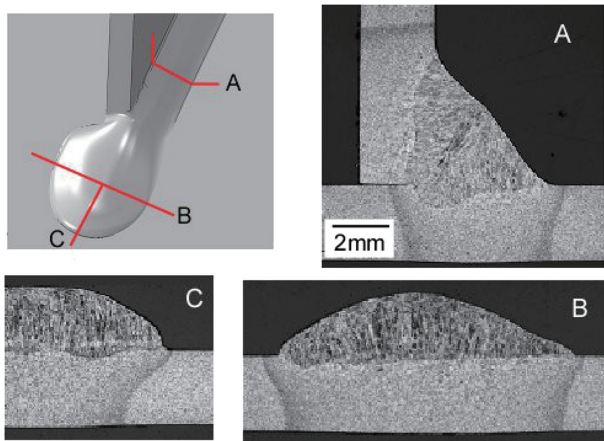


図 20 溶接ビード先端部の詳細観察
Detailed observations of top end of welded bead

次に、基準形状の応力集中部(A)での最大主応力と、補剛ビードを配置した場合の接合先端部(B)の応力を比較した。補剛ビードを配置した場合の接合先端部(B)の応力のほうが基準形状の応力集中部(A)の最大主応力よりも低くなっていることがわかる。なお、別途実施した疲労試験においても、補剛ビードを配置した方が疲労寿命は長くなっており、この点でも傾向が一致した。

ここでは、ルート部を含めた溶接部疲労強度向上手段として補剛ビードの有効性を確認した。補剛ビードの配置により、溶接部近辺の剛性が高まり、溶接部に加わる局所的な応力集中係数が低下したと考えられる。本技術は、通常の溶接構造部材で疲労き裂の発生が懸念される箇所に数十 mm の溶接ビードを追加するもので、生産上の負荷を最小限に抑えた疲労強度向上技術といえる。しかしながら、実部材においては補剛ビード配置位置の制約や補剛ビードの追加に伴う応力状態の変化などが想定され、試行錯誤の試作評価に陥ることが懸念される。このため設計段階で本技術を織り込めるように、技術の体系化を進めていきたい。

5. 結 言

自動車足回り部材の軽量化を念頭に、アーク溶接継手の疲労強度向上に関する課題および最近の研究成果を概説した。ますます要求の高まる高強度化、薄手化のニーズに応じていくためには、従来にも増して信頼性の高い溶接継手を提供する必要があり、材料技術のみならず部材形状に踏み込んだ信頼性向上技術が必要となる。さらに、足回り部材の溶接においては高強度化に伴う水素脆化や薄手化に伴う耐食性の確保¹⁶⁾も重要な課題とされている。

一方、足回り部材の製造では、継手形状に対する自由度の高さやプレス部品の組み付け誤差に対するロバスト性の

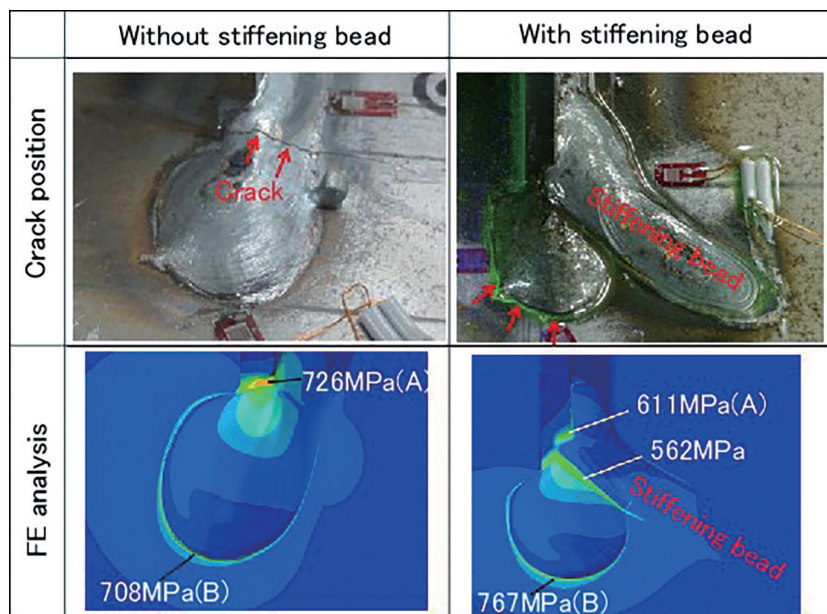


図 21 実験による疲労き裂発生位置と解析による最大主応力の関係
Relationship between crack positions and stress concentration parts

観点でアーク溶接が多用されており、当面その傾向は続く
と予想されるが、低入熱のレーザ溶接もしくはレーザアーク
ハイブリッド溶接等の適用が可能となれば、疲労強度や
耐食性により優れた部材の製造が可能になると考えられる。
また、UIT やショットピーニングのような後処理技術
も圧縮残留応力の付与による疲労強度向上とスラグ除去に
よる塗装後耐食性の向上に有効な手段になる。今後とも、
アーク溶接のメリットを活かした信頼性の高い継手を実現
するとともに、新たな接合プロセス開発を通じた新工法の
提案によって自動車の軽量化に貢献していきたい。

参考文献

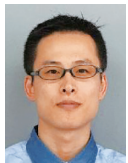
- 1) 近藤正恒：溶接学会誌. 79 (8), 42 (2010)
- 2) 自動車技術会疲労信頼性部門委員会：これからの車体の疲労
耐久性評価への新しい提案. 自動車技術会シンポジウムテキ
スト. (06-00), (2000)
- 3) 野瀬哲郎：溶接学会誌. 77 (3), 210 (2008)
- 4) 糟谷 正 ほか：溶接学会論文集. 27 (2), 158 (2009)
- 5) 石田欽也 ほか：溶接学会全国大会講演概要. 88, 45 (2011)
- 6) 松下宗生 ほか：溶接学会全国大会講演概要. 88, 154 (2011)
- 7) 鈴木勲一 ほか：神戸製鋼技報. 59 (1), 105 (2009)
- 8) 児玉真二 ほか：新日鉄技報. 393, 83 (2012)
- 9) 古迫誠司 ほか：新日鉄技報. 393, 69 (2012)
- 10) 児玉真二 ほか：溶接学会全国大会講演概要. 2016f, 99 集,
p. 378
- 11) 松田和貴 ほか：溶接学会全国大会講演概要. 2017f, 101 集,
p. 18
- 12) 土谷祥子 ほか：溶接学会全国大会講演概要. 2015s, 96 集,
p. 108
- 13) 児玉真二 ほか：溶接学会全国大会講演概要. 2017f, 101 集,
p. 48
- 14) 小川正裕 ほか：溶接学会全国大会講演概要. 2017f, 101 集,
p. 50
- 15) 丸尾泰弘 ほか：自動車技術会シンポジウム. (06-00), 50-57
(2000)
- 16) 高橋通泰, 内原正人, 迫田章人, 植木光彦, 新里文明：自動
車技術会論文集. 28 (2), 143 (1997)



児玉真二 Shinji KODAMA
鉄鋼研究所 接合研究部
主幹研究員 工博
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



松田和貴 Kazuki MATSUDA
鉄鋼研究所 接合研究部
研究員 工博



石田欽也 Yoshinari ISHIDA
鉄鋼研究所 接合研究部
主任研究員



小川正裕 Masahiro OGAWA
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部
主幹研究員