

アルミニウム形材における FSW の 継手強度とシミュレーション

Strength of FSW Joints in Aluminum Extrusions and Simulation

林 誠 次*

Seiji HAYASHI

山 口 俊 幸*

Toshiyuki YAMAGUCHI

小 岩 剛*

Takeshi KOIWA

三 上 浩 子*

Hiroko MIKAMI

黒 木 盛 男*

Morio KUROKI

要 旨

軽量かつ低投資で高い結合効率が期待できる自動車車体構造として、アルミニウム形材を摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding: FSW)で結合する構造を検討した。その構造構築にあたり、アルミニウム形材の FSW 継手強度を、MIG およびレーザMIG継手と比較した。試験は、衝突時の強度を考慮し、静的および動的な試験を実施した。その結果、FSW 継手の動的強度は接合条件により性能が大きく左右されることが明らかになった。加えて、FSW継手部のモデル化を試み、シミュレーション技術の構築を図った。

ABSTRACT

The use of aluminum extrusions joined by friction stir welding (FSW) was examined under the supposition that such a method might produce a vehicle body structure with highly efficient joints that is also lightweight and low cost. The strength of an FSW joint of aluminum was compared with MIG and laser MIG welding in the fabrication of such a structure. Static and dynamic tests were performed in order to evaluate the collision strength of the FSW joint. As a result, it was determined that welding conditions largely determine the dynamic strength performance of the FSW joint. Additionally, modeling of an FSW joint was attempted and simulation methods were devised.

1. まえがき

地球温暖化、大気汚染、石油価格の高騰と自動車を取り巻く環境はますます厳しくなり、車体の軽量化が一層重要となっている。軽量化技術の一つとして、アルミニウム形材を鍛造部品もしくはプレス部品で結合する構造があり、このような構造は既に量産されている⁽¹⁾。本稿では、この結合部の鍛造部品、プレス部品を廃止し、金型投資を低く抑えられる形材で構成した構造を検討した。FSWの適用により、スポット溶接の点接合に対し連続接合ができるため、継ぎ手強度の高い構造が可能となる。また、MIG溶接に比べ熱ひずみが少ないため、車体精度を確保しやすい。加えて、レーザ溶接に比べ低投資なため、今後少量生産車を中心に、FSW の適用が増加すると予想される。

FSW はさまざまな研究がおこなわれており⁽²⁾⁻⁽⁴⁾、鉄道車両や自動車車体の一部に適用され始めている。しかしながら、生産性も含め、車体骨格への適用を考慮した重ね継手

の強度およびその動的特性についての報告例は少ない。

そこで、FSWを用いて重ね接合したアルミニウム形材フレームの強度試験をおこない、FSW継手の評価をおこなった。比較として片側アクセス可能な MIG、レーザ MIG 溶接を選択した。さらに、FSW継手のシミュレーション技術の構築をおこなった。

2. 試験体および試験方法

2.1. 試験体形状と試験内容

車体構造検討部位は、代表的な車体構造である車体前部のフロアフレーム、アウトリガ、サイドシルの接合部を想定している。本部位は、静的強度だけでなく、衝突時の動的強度が要求される。その具体的構造を Fig. 1 に示す。当該部位にアルミニウム形材を適用し、FSW接合にて閉断面化した構造を検討した。試験は本部位の荷重方向を考慮した試験体を用い、静押し試験及び落錘試験を実施し、接合部の評

価をおこなった。また、FSW継手のシミュレーション技術構築のため、高速引張試験を実施し、その動的特性について調査した。

2.2. 試験材料及び接合条件

試験母材は、A6063S-T5のアルミニウム型材であり、スペースフレームで量産実績のある材料である⁽¹⁾。試験体は型材より切り出して作成した。試験体および板厚は各試験に合わせ選択した。試験材の化学組成と機械的特性をTable 1 と Table 2 に示す。

FSW 継手強度の比較として、MIG、レーザ MIG 継手を選択した。各接合条件の決定においては外観上の品質および光学顕微鏡による断面観察により欠陥のないことを確認した。FSW のツールはショルダー径φ 15 mmを使用した。接合条件として、FSW、MIG、レーザ MIG 溶接の送り速度をそれぞれ 200、1500、2000 mm/min とした。以下の試験で使われた試験体の接合条件は、ことわりの無い限りすべて同一条件でおこなった。

2.3. 静的試験の試験方法

静的強度試験は車体の構造の一部を模した形状にて試験をおこなった。Fig. 2 と Fig. 3 に試験体と実験装置の概要を示す。圧縮試験装置は、門柱型万能試験機を使用した。

Table 1 Chemical composition of parent materials A6063S-T5 (%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.40	0.15	0.00	0.03	0.47	0.00	0.00	0.02	Bal

Table 2 Mechanical properties of parent materials A6063S-T5

Tensile strength [MPa]	Yield stress [MPa]	Elongation [%]
223	202	12

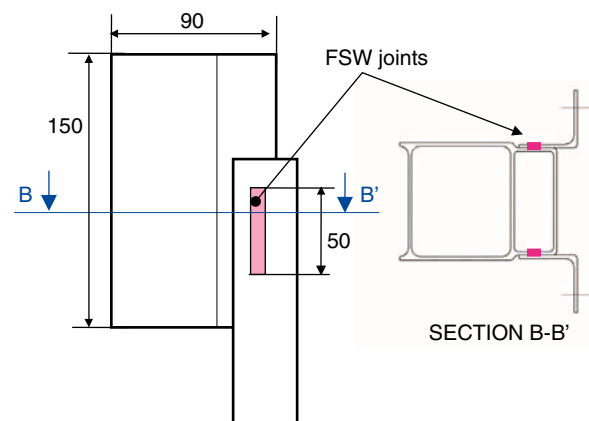


Fig. 2 Test specimen

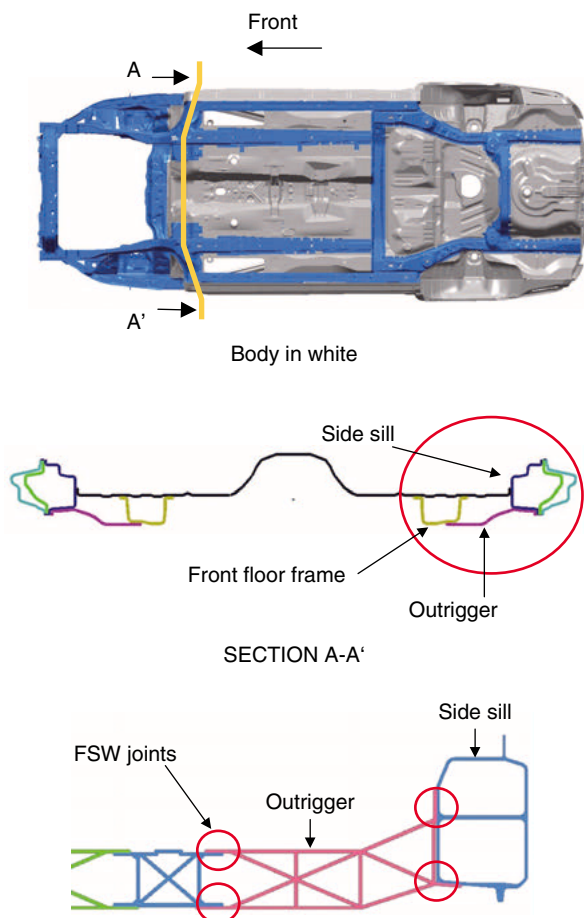


Fig. 1 Body structure with FSW joints

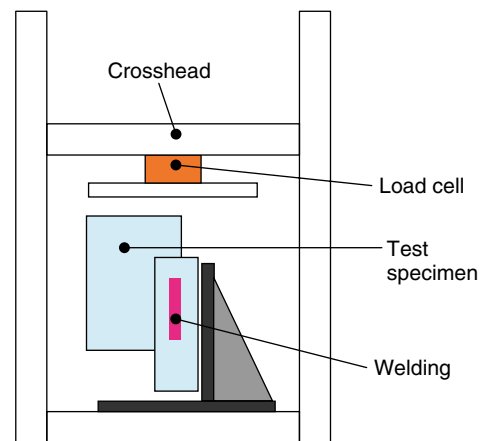
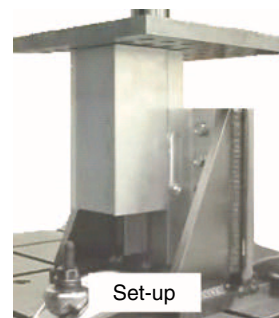


Fig. 3 Device of static load test and set-up

荷重は、クロスヘッドに取り付けられたロードセルにより測定し、ストロークはクロスヘッドの変位を値としてとった。実験での入力を想定し、接合部の中心が荷重中心になるように位置決めをおこない、接合部にせん断荷重を中心とした複合的な荷重が入るようにした。試験速度は 10 mm/min とした。

試験体は FSW とレーザ MIG は重ね継手で接合し、MIG 継手は実用性を考慮しフランジの端部を重ねすみ肉溶接した。接合部の長さはすべて 50 mm に統一した。接合方向は型材の押し出し方向である。

2.4. 動的試験の試験方法

動的強度は落錘試験により評価した。試験体は、静的試験との比較ができるように静的試験と同様、構造体の一部を模した形状の試験体とした。また、継手部にかかる荷重方向も静的試験と同じとした。継手部にかかる荷重と安定性の面から動的試験においては片持ち構造から両持ち構造に変更し、接合部の長さは 170 mm に延長した。Fig. 4 と Fig. 5 に実験装置概要と試験体を示す。試験は錘を高さ

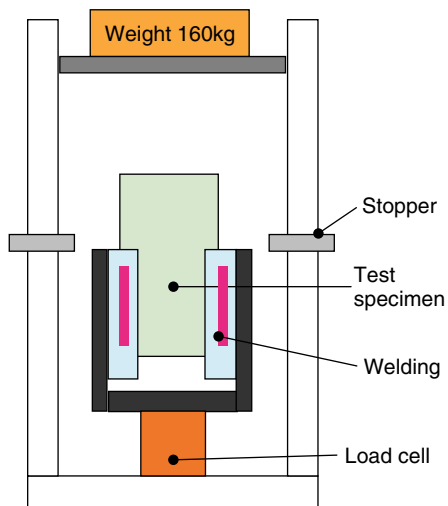


Fig. 4 Device for falling weight impact test

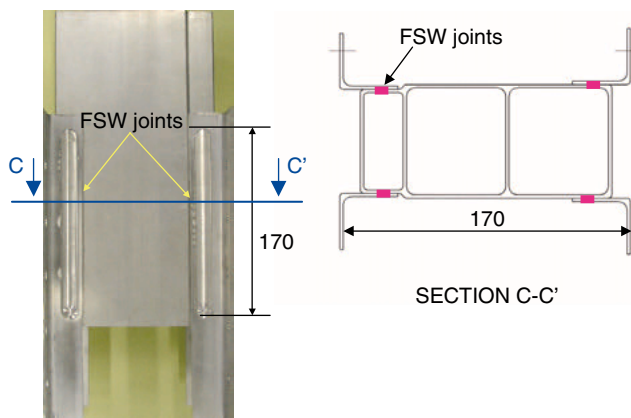


Fig. 5 Test specimen for falling weight impact test

3.5 m より自由落下させ、衝突時の錘の速度が 8.3 m/sec となるように設定した。荷重は試験体の下に設置されたロードセルにより測定し、ストロークは錘の位置をレーザ変位計にて測定した。

3. 試験結果

3.1. 静的試験結果

Fig. 6 に静的試験結果を示す。図中において荷重が急落したところは、継手部が破断したことを示している。FSW 継手とレーザ MIG 継手は、ストローク 7.5 mm のところで破断し、MIG 継手は 4.5 mm で破断した。FSW 継手の最大荷重は、MIG 継手と同等であり、レーザ MIG 継手に対し 20%の低い値を示した。FSW 継手の破断までのストロークはレーザMIGと同等の値を示した。FSW継手はMIG継手に対して同等以上の強度があることが確認できた。

破断後の各継手部の写真を Fig. 7 に示す。FSW 継手の破断形態は、接合部周辺のひずみの増大とともにL字形のフランジ部が変形し、FSW加工穴を起点として直線上に破断した。その破断面を Fig. 8 に示す。これより破断部が未接合部の端部であることが確認できた。レーザ MIG 継手は、フランジの変形の後、破断に至るが、最終的な破断形態は一樣ではなく、ばらつきがあった。MIG継手はすべて溶接ビード部にて破断した。

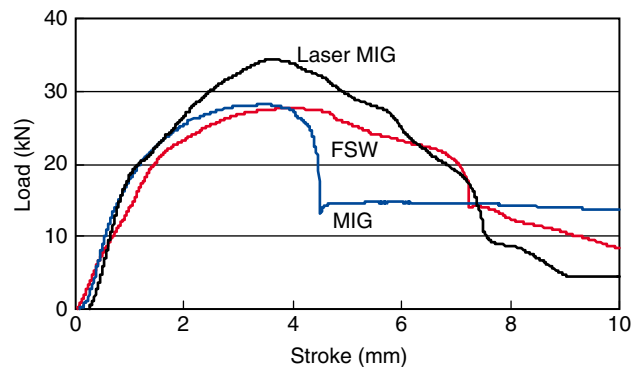


Fig. 6 Stroke – static load for welded joints

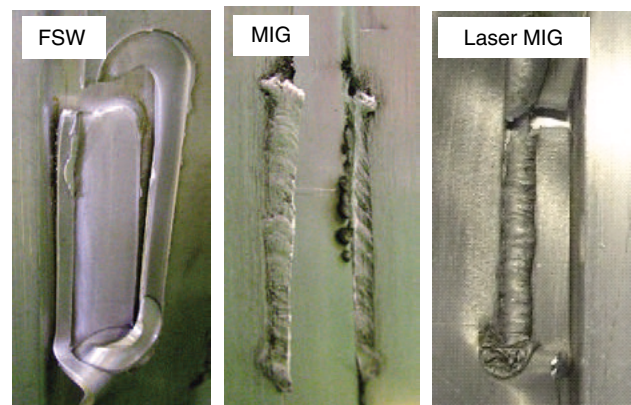


Fig. 7 Welded joints after static load test

3.2. 動的試験結果

Fig. 9 に荷重とストロークの関係を示し、Fig. 10 に試験体の破断の様子を示す。FSW継手は未接合部の端部で直線上に破断し、MIG 継手は溶接ビード部と熱影響部(Heat-affected zone: HAZ)で直線的に破断した。レーザ MIG 継手は試験体の上部が圧壊し、接合部の破断は起きなかった。FSW 継手と MIG 継手の破壊形態は静的試験と同じであった。レーザ MIG 継手の荷重は試験体が圧壊したためストローク 10 mm 以後、100 - 200 kN の間で変動した。MIG 継手の最大荷重は、レーザ MIG 継手に対し 10%低い値を示し、ストロークが 15 mm に達した後、破断した。FSW 継手の最大荷重は MIG 継手と同じであるが、MIG 継手よりも少ないストロークで接合部の破断が起きた。この結果は静的試験で得た傾向と異なり、FSW継手が衝撃に弱いことを示している。

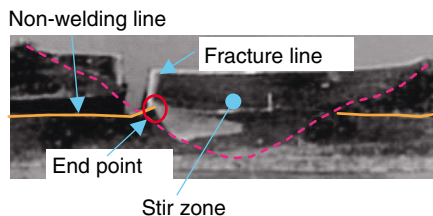


Fig. 8 Section of FSW joint after static load test

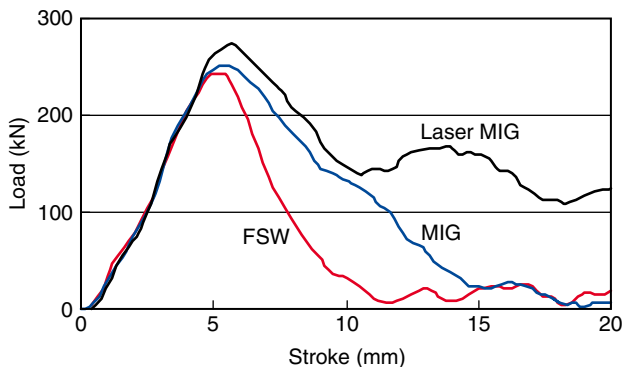


Fig. 9 Stroke-dynamic load for welded joints

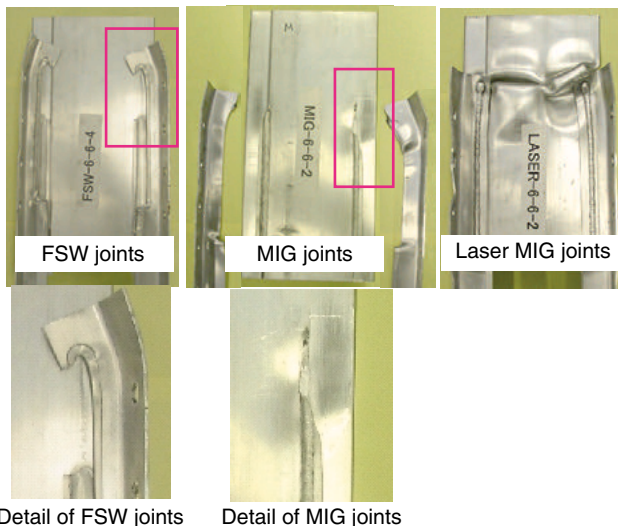


Fig. 10 Specimen after dynamic load test

4. 考察

4.1. 静的動的強度の考察

動的試験結果より FSW 継手の動的強度が、他継手に比較して弱いことがわかった。この原因の解析として FSW 継手の断面を観察した。Fig. 11 にその断面図を示す。かくはん部と母材の境界部において、下板の材料が上方向に巻上げられているのが確認できる。これは FSW の製造上の特性で発生する現象である。Fig. 12 のように重ね接合の場合、下の母材を上の方材にかくはんしなければいけない。上板と下板の境界部では上方向に巻上げられることにより一種の切欠き状になる。そのため、切欠きの形状効果により動的破壊じん性が低下し、継手部のエネルギー吸収量が低下したと考えられる。これは、ホプキンソン・バー法を応用した実験例において、アルミニウム合金の動的破壊じん性値は静的破壊じん性値より低くなっている報告より裏づけられる⁽⁶⁾。

4.2. 内部接合形状に関する解析

FSW 接合時の巻上げが継手強度に及ぼす影響について解析をするため、FSW の接合条件を変更し、巻上げを少なくした継手を作成した。改良後の FSW 継手の断面を Fig. 13 に示す。この断面から境界部の巻上げが少なくなっていることが確認できる。この接合状態を以後の説明では巻上げ

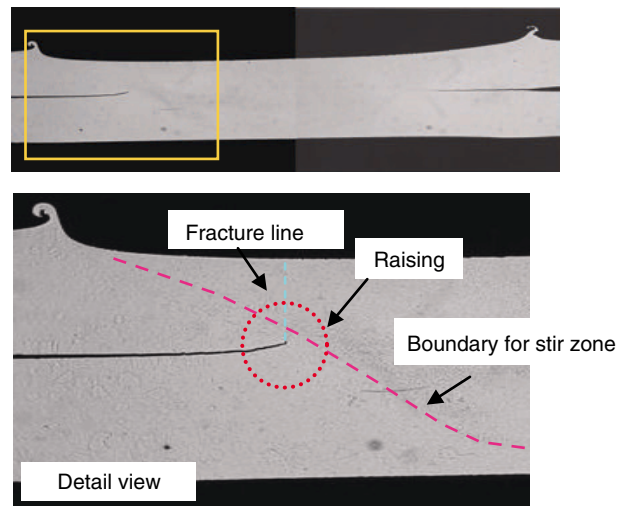


Fig. 11 Section of FSW joint

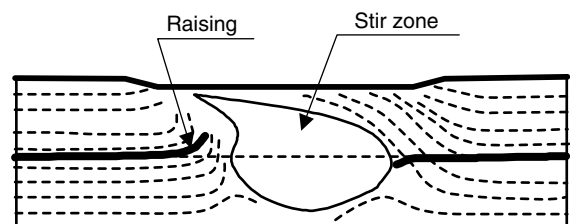


Fig. 12 Principle of FSW

なしと表現する。4章で実施した静的強度試験をおこない、巻上げありとなしの強度比較をおこなった。その結果を Fig. 14 と 15 に示す。巻上げなしの継手はありに比べ、エネルギー吸収量が増えている。これは破断形態が変わったことに起因している。巻上げありの場合は、かくはん部の片側が直線的に破断したが、巻上げなしの場合は、かくはん部の両側で破断しており、片側破断のようにき裂がすぐに伝

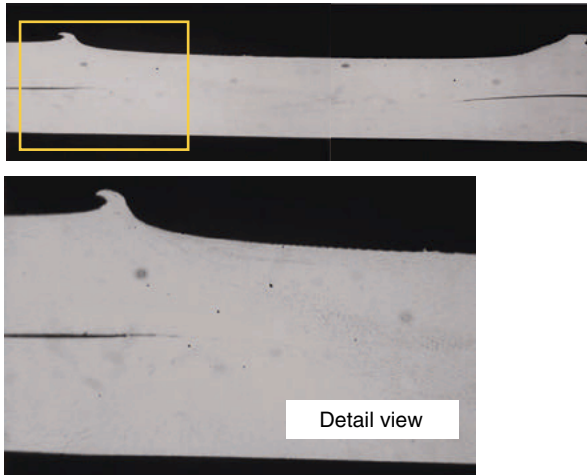


Fig. 13 Section of FSW joint under new conditions

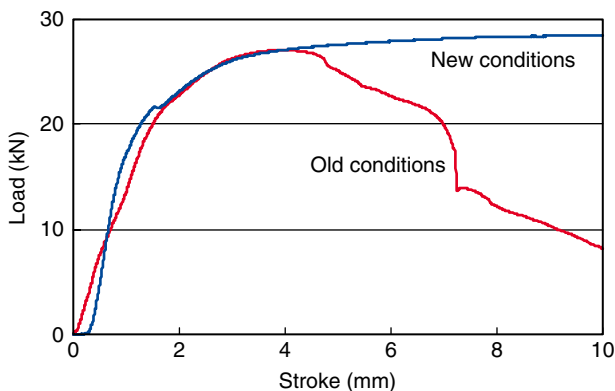


Fig. 14 Comparison of load under new and old conditions

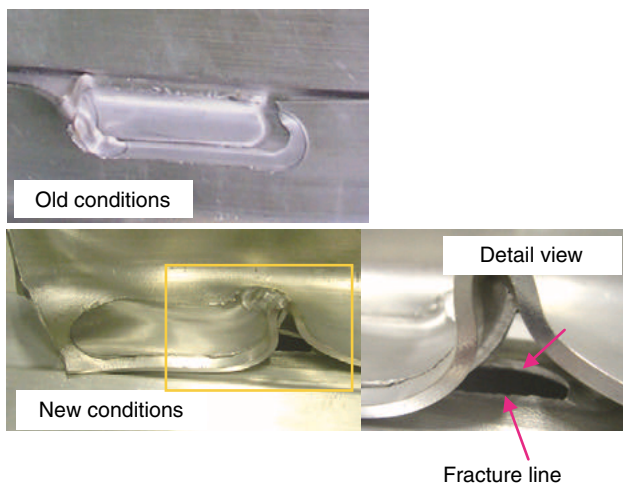


Fig. 15 Comparison of fracture mode of new and old conditions

播することがない。そのためエネルギー吸収量が増えたといえる。接合条件による巻上げの状態により、破壊形態および荷重特性が変わることがわかった。

5. シミュレーションモデル

5.1. 高速引張強度試験

高速引張試験は、FSW 継手部のシミュレーション技術を構築するためにおこなった。調査項目は継手部の引張強さとそのひずみ速度依存性である。試験片は板厚 2 mm、巾 5.4 mm のものを使用し、突合せ継手にて試験をおこなった。ひずみ速度は 0.1, 10, 200/s の 3 種類でおこなった。シミュレーションモデルのシェル要素の大きさの決定に対して参考とするため、接合部を中心とした 20 mm の区間の局部ひずみも測定した。局部ひずみは試験片の平行部を 1 mm 間隔でマーキングしておき、その伸びを測定した。

ひずみ速度 200/s の母材の引張強さは、0.1/s の場合に対して 6～7% 上昇する傾向にあった。Fig. 16 に各接合の試験結果を示す。FSW, MIG, レーザ MIG 継手とも母材と同様、ひずみ速度による引張強さの大きな違いはみられなかった。FSW とレーザ MIG 継手の引張強さが 15% 上がったことが確認できた。なお、FSW 継手の破断部位はすべて HAZ であった。

次に局部ひずみの分布を調べた。Fig. 17 に FSW 継手のひずみ分布測定結果を示す。破断部のひずみが中心になる

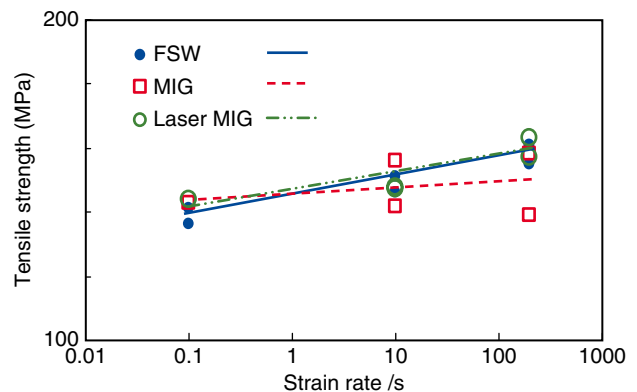


Fig. 16 Tensile strength for strain rate of welded joints

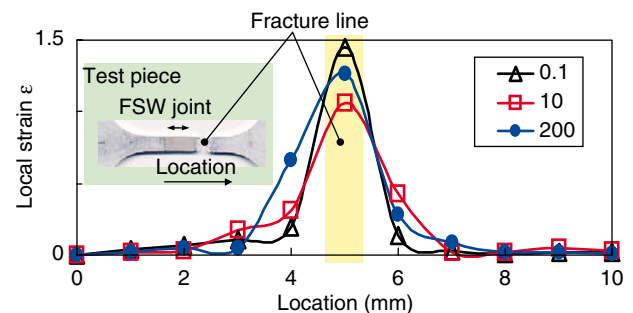


Fig. 17 Local strain for FSW joints under high-speed tensile test

ように表示しており、横軸は試験片位置を示す。試験片の破断部を中心とした10 mm区間での伸びにおいて、ひずみ速度 200/s のひずみ量は、0.1/s の場合に対し 19%増加している。破断部を中心として、2-4 mm の範囲で局部的にひずみが大きくなっていることが確認できた。

5.2. FSW 部のシミュレーションモデルの作成

高速引張試験結果およびFSW接合部の断面より、シミュレーションモデルを作成した。Fig. 18 にそのシミュレーションモデルの考え方を示す。A：かくはん部とB：HAZおよびC：母材に分けシェルモデルを作成し、材料特性をそれぞれ設定した。板厚は、接合時の板減を考慮し決定した。重ね部の板厚のオフセット量は形状効果がないようになるべく小さくした。FSW接合時に終端部にできる穴については接合長さがある程度以上であれば最大強度に影響しないことを確認できているので当該部のモデル化は省略した。

Fig. 19 は、Fig. 17 の局部ひずみ量から各長さ(Fig. 17 の横軸の区間長さ)によるひずみ量の最大値、最小値を算出したものである。最大値は破断部のひずみを中央にして計算し、最小値は破断部のひずみを端部にして計算した値である。区間長さ 4 mm の場合で、ひずみ量の最小値は 0.45, 最大値は 0.65 であることがわかる。シェルサイズは板厚および Fig. 17 のひずみ分布より決定した。ひずみ速度によりひずみの分布形態に違いがあるが、いずれも区

間長さ 4 mm 以内にひずみが集中していることから、シェルサイズは 2-4 mm が適切であると判断した。

材料定数は、試験で得られたひずみ速度係数と応力-ひずみ線図より同定をおこなった。材料モデルは等方弾塑性モデルを使用した。アルミニウム型材のモデル化においては角稜部をシェル要素にて表現し、当該部位の面積に比例した板厚を設定した⁽⁵⁾。試験との相関ではひずみ速度係数と破断ひずみの二つの数値を修正した。その結果、シミュレーションモデルの FSW 継手部の破断ひずみは実験値に対して 10%低い値となった。このひずみ量は、Fig. 19 で示した実験値のひずみ範囲より小さい値であった。この理由として次にあげることが考えられる。

ひずみの値は、重ね継手ではなく突合せ継手で試験した値を使っている。突合せ継手では、重ね継手でみられた巻上げの形状効果による破壊じん性の低下の影響はない。そのため重ね継手では突合せ継手による高速引張試験の結果に対し、破断ひずみ量が小さくなっている。

5.3. 計算結果

Fig. 20 - Fig. 23 に静的試験と動的試験の試験結果と計算結果の比較を示す。それぞれ荷重-ストローク線図と試験後の破断形態の比較を示す。試験と計算との比較では最大荷重及びエネルギー吸収量共 5%以内であり、試験と計算との相関はよくとれており、破断形態も一致している。

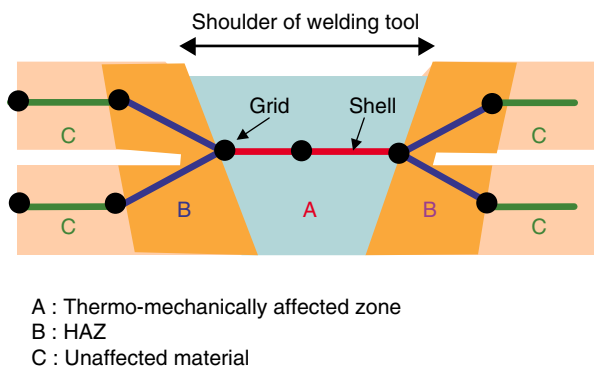


Fig. 18 Simulation model for FSW joints

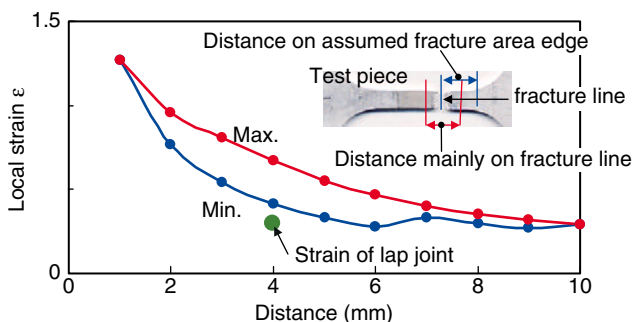


Fig. 19 Local strain distance on assumed fracture area

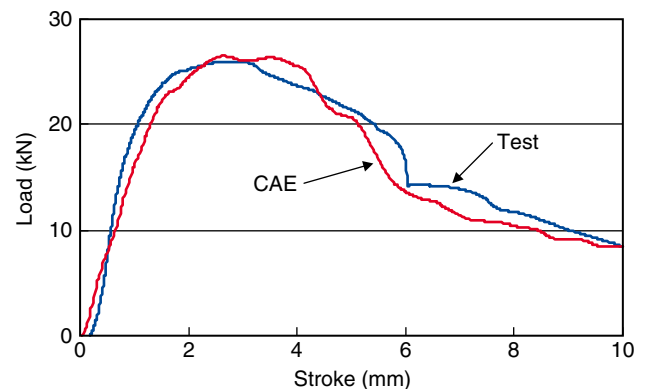


Fig. 20 Comparison of static load of test versus CAE

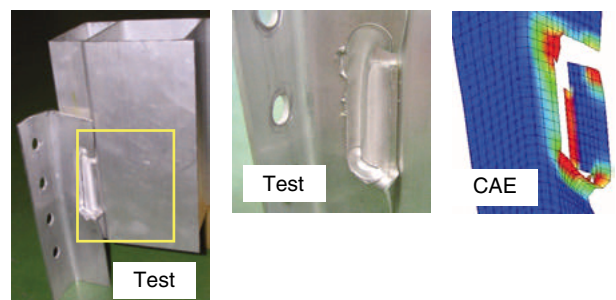


Fig. 21 Comparison of fracture mode of static load test versus CAE

5.4. シミュレーションによる巻上げの検証

巻上げのない FSW 継手は、破壊じん性の低下がないため、落錘試験ではレーザ MIG 継手と同様に継手部が破断せず母材部で圧壊するであろうと予測ができる。これについてシミュレーションにて検証をおこなった。内部接合形状に関する解析より、接合条件の違いによる静的強度の比較試験では、最大荷重は変わらずエネルギー吸収量が増えることがわかった。この結果より、破断までの許容ひずみが増えていることがわかる。シミュレーションでは FSW のモデル作成で同定した破断ひずみに対して、その数値のみを

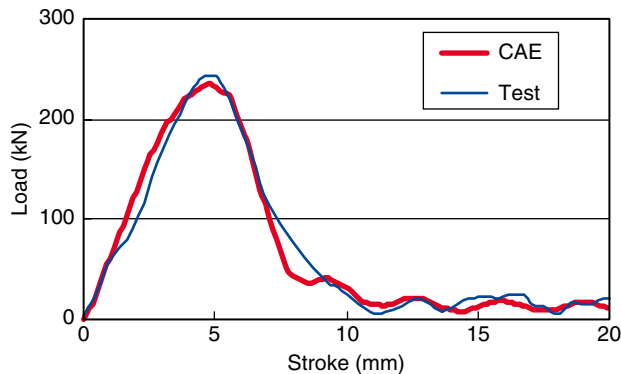


Fig. 22 Comparison of dynamic load of test versus CAE

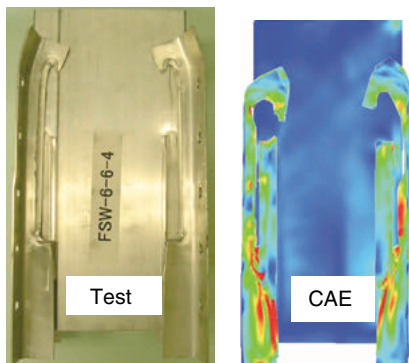


Fig. 23 Comparison of fracture mode of dynamic load test versus CAE

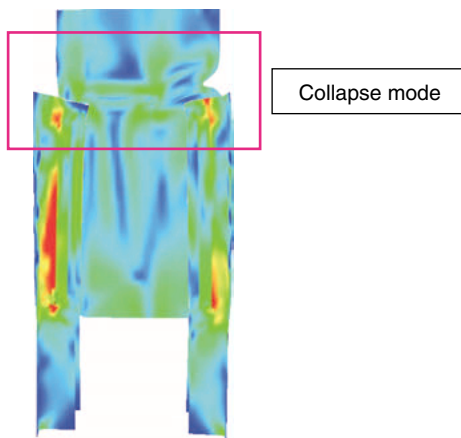


Fig. 24 Result of calculation that assumes non-rising in FSW

増加させた場合、落錘のシミュレーションでは継手部が破断せず、レーザ MIG と同様に母材部が圧壊することが予測される。

シミュレーションにおいて破断ひずみの値は、Fig. 19 から得たストローク 4 mm での平均ひずみの最大値を使った。この計算結果では接合部が破断せず母材部が圧壊しており、レーザ MIG と同等の性能であることがわかった。Fig. 24 に示す計算結果より、母材部が圧壊しているのが確認できる。FSW 継手強度は、接合条件により破断ひずみに影響を及ぼし、動的性能に大きく影響を及ぼすことがシミュレーションで確認できた。

6. 結論

アルミニウム型材の FSW 継手について静的、動的強度の評価およびそのシミュレーション技術について研究をおこない、以下の結果を得た。

- (1) 静的強度において、巻き上げのある FSW 継手の強度は、レーザ MIG と MIG 継手の間に位置し、巻き上げを少なくした FSW 継手の強度は、レーザ MIG と同等の強度が得られる。
- (2) 動的強度において、巻き上げのある FSW 継手の強度は、レーザ MIG および MIG 継手より低い。
- (3) FSW 施工時に発生する巻上げは、切欠きの形状効果により、動的破壊じん性を低下させ、破壊形態、荷重特性に影響を及ぼす。
- (4) FSW 継手のモデル化においては、継手各部位の材料特性の設定とシェル要素を使ったモデル化により、静的および動的挙動を良好にシミュレートすることができる。
- (5) シミュレーションにおいて、巻き上げのない FSW 継手の動的強度の予測をし、レーザ MIG と同等の結果を得た。

参考文献

- (1) 堀尾幸一, 藤村章, 斉藤政昭, 角田和彦, 瀧口士郎: 超低燃費ハイブリッドカー「インサイト」の開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.2, p.1-8
- (2) 谷川久男, 堀久司, 宮道知典, 難波圭三: 摩擦攪拌接合継手の引張試性質, 軽金属溶接, Vol.43, No.5, p.232-239(2005)
- (3) 江口方孝, 岩木俊一, 岡田俊哉, 田中直, 大岩直貴, 難波圭三: 摩擦攪拌接合部の形態と組織, 軽金属溶接, Vol.43, No.5, p.18-29(2005)
- (4) Cederqvist, L., Reynolds, P.A.: Properties of Friction Stir Welded Aluminum Lap Joints, 2nd International Symposium on Friction Stir Welding(2000)

- (5) 漆山雄太, 山田孝之, 鈴木俊次, 河野亘: 衝突用アルミニウムエネルギー吸収部材の研究, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.2, p.141-148
- (6) 日本機械学会: 衝撃破壊工学 第8章 工業材料の衝撃強度, p.183-185

■ 著 者 ■



林 誠 次



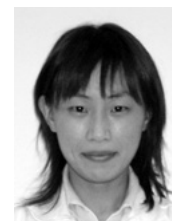
小 岩 剛



黒 木 盛 男



山 口 俊 幸



三 上 浩 子