

アルミ押出型材結合部の強度特性

今村美速・米沢和男・橋村 徹

アルミ・銅事業本部・技術部

Welded joint strength of extruded aluminum tubes

Yoshihaya Imamura・Kazuo Yonezawa・Tohru Hashimura

Using extruded aluminum tubes welded in T and L configurations, the stiffness and strength of tubular joints were investigated. The results indicated that simple set-on joining tends to cause partial penetration and produce low strength joints. An improved joining method known as the "inner through joint" was proposed instead. A pad reinforcement and crossbar addition of aluminum joints with a stiffness equivalent to that of steel joints were investigated. The weight of aluminum joints and steel joints were compared. Using improved aluminum joints, 10-20% weight reduction could be achieved.

まえがき = 近年、排気ガスがもたらす地球環境問題に対して車体の軽量化による燃費の向上が厳しく追求されており、車体へのアルミ材の適用も増加しつつある。今後、本格的な軽量化を図るには車体の骨格にアルミ材を適用していくことが重要な課題とされており、現状の鋼板製車体のように成形した板材を抵抗スポット溶接にてハット形状に組み立てて構成するモノコック構造を、アルミ材に置換するための板材の成形や接合技術の開発が進められている。

いっぽう、種々の部材断面形状の選択が可能な点で優位とみられているアルミ押出型材をもちいたスペースフレーム構造の検討もなされており、Audi A8 など実用化された乗用車もある¹⁾。この構造はパイプ状部材をアーク溶接で組み立てるのが一般的であり、溶接熱影響による構造体の変形と材料の軟化にともなう結合部の剛性および強度劣化を回避するため、設計においては結合部の特性を十分に把握し、効率的な結合ならびに接合方法の選択が重要となる²⁾³⁾。

ここでは基礎的検討としてアルミ押出型材を溶接によってT形ならびにL形につなぎ合わせた結合体を製作して、強度特性を調査することにより溶接の影響を検討し、さらに角形鋼管の結合体との剛性比較を実施するとともに結合部単体を考慮した際の軽量化効果について検討した結果を報告する。

1. 試験方法

1.1 供試材

供試材にはアルミ押出型材として肉厚3mmのA6N01S-T5材、溶加材には2.4mmのA5356-BYをもちい、角形鋼管としては車体骨格にもちいられる板厚を参考に肉厚1.6mmのSTKR400、溶加材には0.8mmのYGW12をもちいた。母材と継手の機械的性質をそれぞれ第1表に示す。

1.2 溶接方法ならびに結合体

溶接はアルミ合金には手動の交流ティグ溶接、鋼には半自動の炭酸ガスアーク溶接により、第1図に示す簡易なセットオン結合（部材端部を直角に切り落として結

合した形状）でT形ならびにL形結合体の製作をおこなった。

1.3 結合体の強度特性の調査⁴⁾⁵⁾

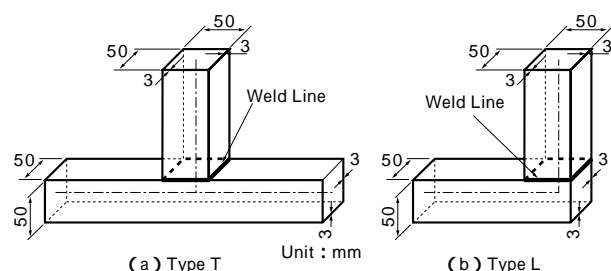
写真1は結合体の曲げ試験の状況であり、T形ならびにL形の結合体は溶接により接合した端板（板厚10mm）

第1表 供試材の母材ならびに溶接継手の機械的性質

Table 1 Typical mechanical properties of used materials and those of welded joints

Base metal	Tensile strength MPa	Yield strength MPa	Elongation %	
A6N01S-T5	277	261	12	
STKR400	455	295	31	

Welded joint (As welded)	Tensile strength MPa	Yield strength MPa	Elongation (%)	Fractured location
A6N01S-T5 A5356-BY	199	125	11	HAZ
STKR400 YGM12	452	288	30	Base metal



第1図 セットオン結合のT形ならびにL形結合体

Fig. 1 Welded tube to tube joints (set-on)



写真1 結合体の曲げ試験状況

Photo.1 Setup for bending component tests (in-plane bending)

を介して、M10のボルトにより第2図に示すように固定治具に締結固定した後に油圧ジャッキで負荷した。荷重負荷の方向は結合体に対して面内（方向）および面外（方向）の二方向とした。測定はジャッキと負荷点（ヒンジ）の間に設けたロードセルから荷重 P を検出するとともに、摺動抵抗線形の変位計をもちいて結合体の変形にともなう負荷点の変位 e を求めることで、第3図に示す P と e の関係がえられる。

実験により結合体のバネ定数 K は P - e 曲線の初期弾性勾配から

$$K = \frac{P_e}{e} \dots\dots\dots (1)$$

でえられ、曲げアーム長を r （ここでは $r=350\text{mm}$ 一定）とすれば結合体の回転角 θ は

$$\theta = \frac{e}{r} \dots\dots\dots (2)$$

となり、結合体の曲げ回転剛性 K は(3)式で示される。

$$K = \frac{P_e r}{e} = \frac{P_e r^2}{e} = Kr^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここでは、この K と最大荷重 P_{\max} を評価値としてもちいた。

2. 試験結果ならびに種々の検討

2.1 セットオン結合における結合体の強度特性

第4図にセットオン結合における結合体の曲げ試験の結果を示す。曲げ回転剛性は第5図に例示したFEMより求めた値、最大荷重は塑性解析法による崩壊荷重と比較した。

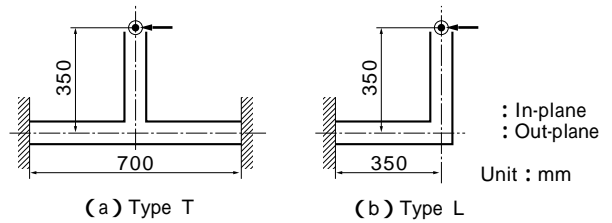
曲げ回転剛性は実験値のほうが低いものの、実験による結合体形状や負荷方向変化による剛性変化と一致した傾向を示しており、結合体と拘束治具との締結部におけるがたや端板の弾性変形を考慮すれば妥当であると考えられる。

面内曲げの崩壊強度はT形とL形結合体ともに負荷された部材の曲げ強度で決定される。面外曲げの場合はさらに固定される部材のねじりを考慮する必要があり、結果としてT形結合体の曲げ強度は負荷された部材の曲げ強度、L形結合体では固定された部材のねじり強度で決定される。塑性解析法による崩壊荷重は荷重点に近い側の部材の全塑性モーメント M_0 と固定側部材の全塑性トルク T_0 から(4)式のように算出した。

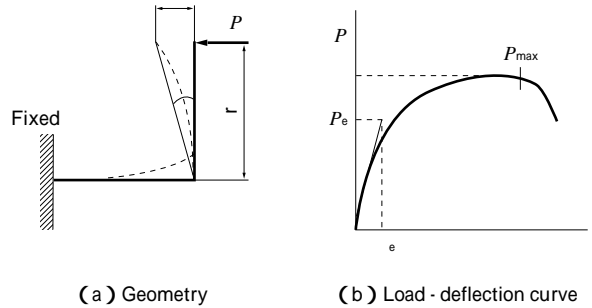
$$P_B = \frac{M_0}{r} = \frac{Z_p \sigma_y}{r}, P_T = \frac{T_0}{r} = \frac{Z_T \tau_y}{r} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 Z_p は塑性断面係数、 σ_y は降伏応力、 Z_T は塑性ねじり断面係数、 τ_y はせん断降伏応力（Von Mises降伏条件をもちいて $\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$ ）、 P_B は曲げ崩壊荷重、 P_T はねじり崩壊荷重である。

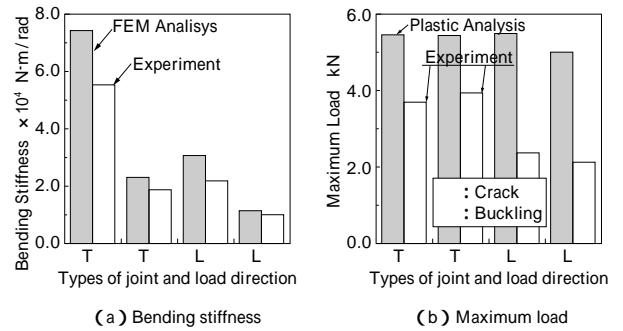
最大荷重の実験値は(4)式で求めた崩壊荷重よりも低くなり、T形結合体で70%程度、L形結合体で50%程度となった。このことはA6N01S-T5材の母材と継手の機械的性質（第1表）を比較してえられる、溶接による30~50%程度の強度低下の値と一致をみせているが、さらにL形結合体では開口端が存在することから、そ



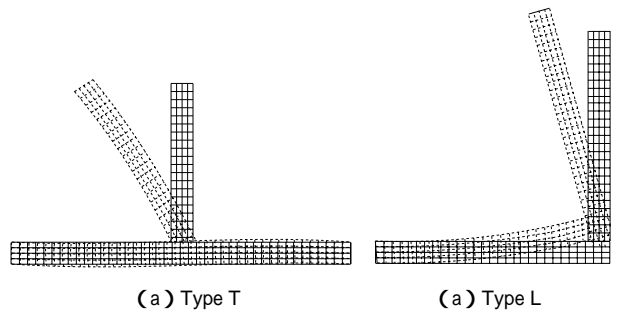
第2図 試験体寸法と負荷方向
Fig. 2 Specimen size and loading direction



第3図 記号の説明
Fig. 3 Notations



第4図 セットオン結合における結合体の曲げ試験結果
Fig. 4 Result of bending test on set-on joints



第5図 FEMによる面内曲げの変形
Fig. 5 Deformation of in-plane bending by FEM

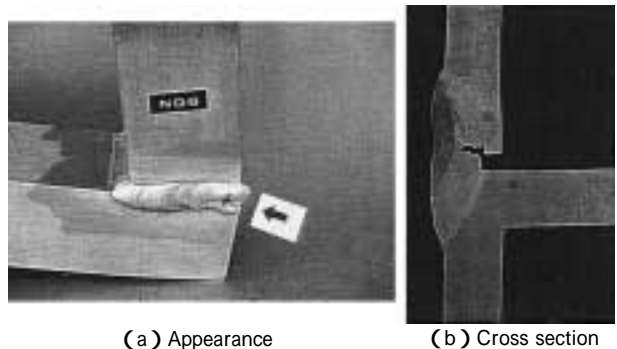


写真2 引張部からの溶接金属部の破断
(破壊形態 : 不完全溶け込み部からの亀裂)
Photo.2 Fracture of weld metal portion subjected to tension
(Mode : Crack from incompletely penetrated portion)

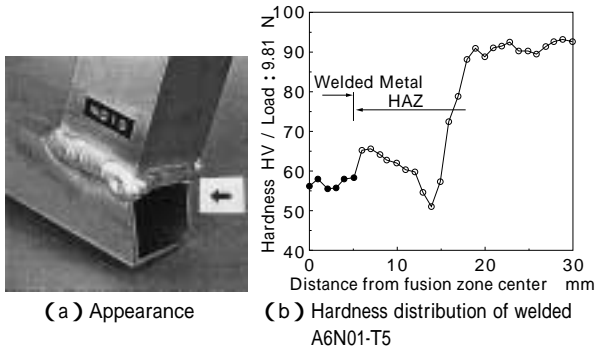


写真3 母材圧縮部の変形
(破壊形態 : 溶接熱影響軟化部の座屈)
Photo.3 Distortion of base metal portion subjected to compression
(Mode : Buckling of heat-affected softened zone by welding)

の近傍の部材壁面の局部座屈も大きな影響を及ぼしているものとする。

破壊状態については面内曲げでは、写真2に示すような引張を受ける溶接金属部からの破断(破壊形態)が観察され、この部位の断面を詳細に調査した結果、それが溶接の不完全な溶込みによる裏面の未溶融スリットからの亀裂であることが確認された。また面外曲げでは、写真3に示すような圧縮を受ける部位の局部座屈(破壊形態)が観察され、この部位は硬さ分布から溶接熱影響による軟化部であることがわかる。破壊形態では溶接金属部は健全に保たれており、溶接熱影響部の強度のみを基準にすることで確実な設計が可能となる。逆に破壊形態の原因となる不完全な溶込みは、溶接施工条件の適正化によって、ある程度は改善されるものの皆無とはならず、また発生した場合にその部位の特定が難しいために設計を不確かなものとする要因となる。

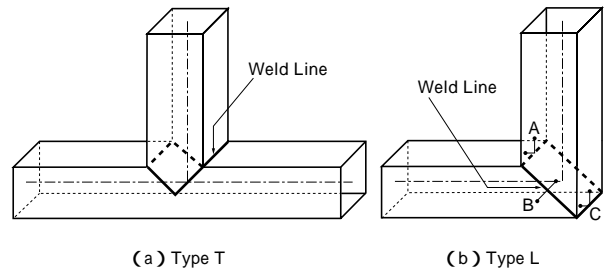
セットオン結合はその結合形状や荷重方向によっては破壊形態を生じる問題のある結合方式であることが判明した。

2.2 結合方式の改善

セットオン結合で生じた不完全な溶込みを低減するために、第6図に示すような結合方式(以下、インナースルー結合と呼ぶ)を選択した。この結合方式はL形結合体の開口端をなくし、溶接が突き合わせとなるように配慮したもので、セットオン結合にくらべて溶接のねらい位置が改善され、さらに溶接部近傍の温度が均一化され写真4のようにあらゆる部位で完全溶込み状態がえられた。

第7図は面内曲げの荷重と変形量の関係においてインナースルー結合をセットオン結合と比較したものであり、インナースルー結合にすることでT形ならびにL形結合体ともに広い塑性変形域と、高い最大荷重がえられ、最大荷重は破壊形態のような不完全な溶込みによる裏面の未溶融スリットからのき裂ではなく、溶接熱影響による軟化部の局部座屈によって決定される。

このインナースルー結合はアルミ合金製角パイプ同士を結合してもちいるフレーム構造物(以下、アルミフレーム構造と略す)において、溶接金属部を健全に保ちつつ溶接熱影響による軟化部から破壊させる有力な方法の一つと考えている。



第6図 結合方式の改善(インナースルー結合)
Fig. 6 Improved joining method (inner-through)

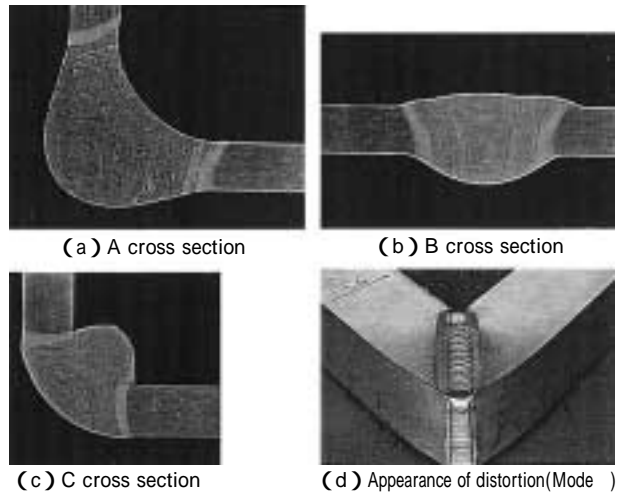
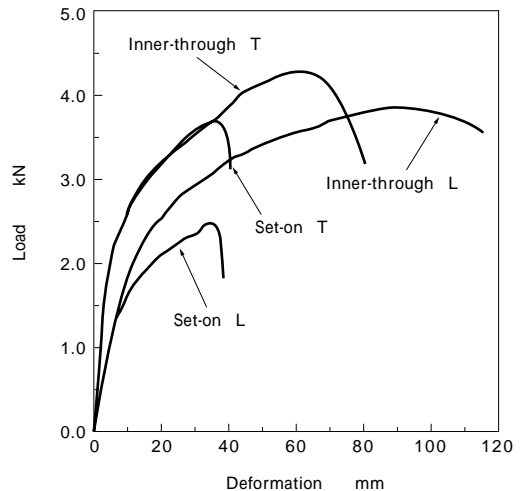
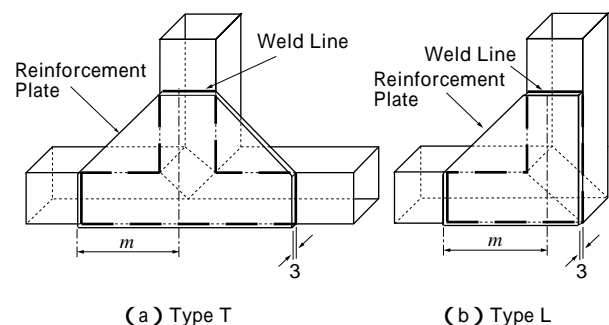


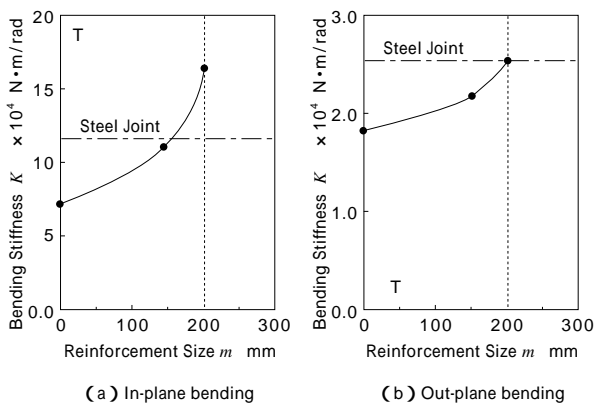
写真4 インナースルー結合の溶接部と変形の例
Photo.4 Cross section in welded portion and distortion of inner-through joint



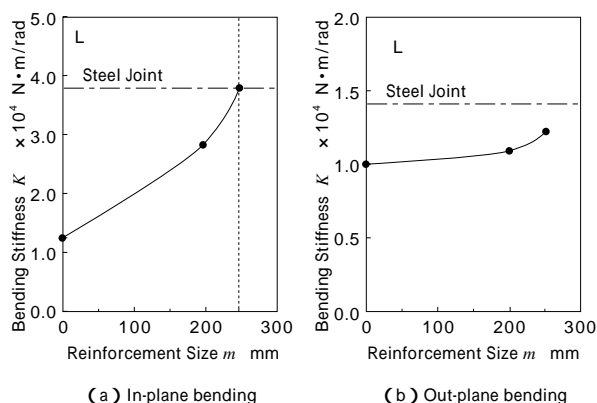
第7図 結合方式による強度特性比較(面内曲げ)
Fig. 7 Comparison of joint strength of set-on with those of inner-through (In-plane bending)



第8図 補強板の取り付けによる補強
Fig. 8 Configuration of pad reinforcement



第9図 T形結合体における補強板寸法の効果
Fig. 9 Effect of pad reinforcement size on bending stiffness (Type T)



第10図 L形結合体における補強板寸法の効果
Fig. 10 Effect of pad reinforcement size on bending stiffness (Type L)

2.3 補強の検討

鋼材にくらべてアルミ材は弾性係数が低く、アルミフレーム構造物においては剛性を確保するための検討が必要となる。ここではインナースルー結合のT形ならびにL形結合体に第8図に示すように溶接によって板厚3mmの補強板を取り付け、補強板寸法 m と曲げ回転剛性の関係から補強効果を調査した。第9図ならびに第10図がその結果である。ここでは補強の目標値として肉厚1.6mmの角形鋼管の結合体(以下、鋼結合体と略す)を考え、その曲げ回転剛性を有する m の値を探索すると、T形結合体では面内、面外ともに $m=200\text{mm}$ となり、L形結合体では面内で $m=250\text{mm}$ となるが、面外は $m=250\text{mm}$ でも不足となる。

このようにアルミフレーム構造の結合部設計には要求特性を満たすための的確な補強の選択が重要となる。

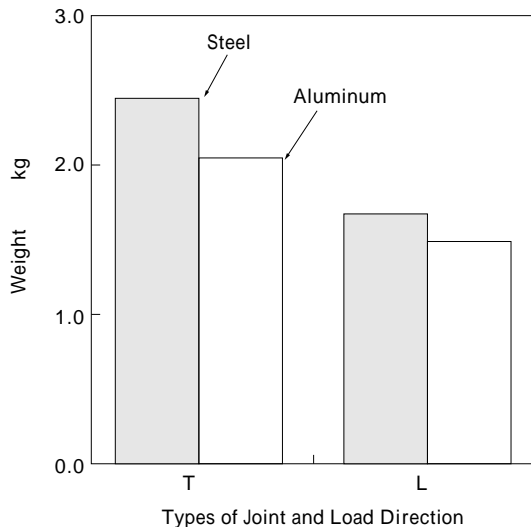
2.4 結合体の重量比較

補強の検討においてえられた鋼結合体と同等以上の曲げ回転剛性を有する補強板を取り付けた結合体と、その目標となった鋼結合体の重量比較を実施した結果を第11図に示す。この結果から結合部単体としては、アルミ結合体は鋼結合体に対して10~20%程度の軽量化が可能であることが判明した。

ここではアルミフレーム構造物において比較的大きな重量を占める結合部を対象に考えているので、アルミフレーム構造物全体を対象とした場合には、さらなる軽量化が実現するものと考えられる。

むすび=アルミ押出形材を溶接によってつなぎ合わせた結合体において強度特性を調査し、溶接による影響の把握とその性能の改善についての検討から以下の結果をえた。

(1) 簡易なセットオン結合では不完全な溶込みが生じやすく、塑性変形域が極端に狭まるとともに最大荷重が低



第11図 鋼結合体とアルミ結合体の重量比較
Fig. 11 Comparison of weight of aluminum joints to those of steel ones

い。

(2) 不完全な溶込み部を低減し、完全溶込みを確保するにはインナースルー結合を選択することが有効であり、セットオン結合にくらべて、広い塑性変形域と高い最大荷重をえることができる。

(3) 補強板の取り付けにより鋼結合体と同等レベルの剛性をもたせたアルミ結合体は、鋼結合体に対して10~20%程度の軽量化が可能である。

参考文献

- 1) B. Irving : Welding Journal, August 1995, p. 29 .
- 2) G. E. Nordmark et al. : SAE Paper 930492, 1993 .
- 3) E. P. Patrick et al. : SAE Paper 920282, 1992 .
- 4) 猪田克美ほか：自動車技術会学術講演会前刷集 No. 851, 1985 , p. 185.
- 5) 角南義治ほか：自動車技術会論文集 No. 38, 1988, p. 34 .