

接合位置を考慮したアルミニウム合金板の圧縮耐荷力

Ultimate strength of aluminum alloy plates in compression considering joining locations

大倉 一郎*, 小笠原 康二**
Ichiro Okura, Koji Ogasahara

*工博, 大阪大学准教授, 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

**大阪大学, 大学院博士前期課程, 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

The ultimate strength of aluminum alloy plates in compression is investigated considering joining locations by the elastic-plastic large deflection analysis with FEM. The aluminum alloys taken into account are heat-treated A6061-T6 and A6005C-T5 and non-heat-treated A5083-O. The softening of material and the residual stresses caused by the friction stir welding (FSW) and the MIG welding are introduced in the analysis. It is shown that the joining locations and the width of plate have a great influence on the ultimate strength. The ultimate strength given by the FEM analysis is formulated to compare it with the design curves specified in Eurocode 9. Finally the curves for the ultimate strength of plates in compression considering joining locations are proposed based on this research.

Key Words: aluminum alloy, ultimate strength, FSW, MIG welding, joining location

キーワード: アルミニウム合金, 耐荷力, 摩擦攪拌接合, MIG 溶接, 接合位置

1. 序論

最近, アルミニウム歩道橋¹⁾²⁾および歩道用アルミニウム床版³⁾⁴⁾が建設されるようになってきた. これらのアルミニウム構造物の設計は, アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案⁵⁾ (以後, JAA 指針と呼ぶ) に従ってなされる. JAA 指針の, 圧縮を受ける両縁支持板に対する幅厚比の規定は, 道路橋示方書⁶⁾の規定に準拠し, 幅厚比パラメータの値 0.7 に対して, 鋼のヤング係数と降伏応力をアルミニウム合金のヤング係数と 0.2%耐力に置き換えることにより与えられている. 鋼の応力-ひずみ関係は降伏応力まで直線で, 降伏応力に達すると水平線とみなされるが, アルミニウム合金の応力-ひずみ関係は 0.2%耐力の近傍で曲線を描く. さらに構造用アルミニウム合金として使用される非熱処理アルミニウム合金 5000 系と熱処理アルミニウム合金 6000 系の応力-ひずみ関係の曲がり方の程度は大きく異なる⁷⁾. したがって, JAA 指針の規定は, 実際の挙動を正しく反映したものとは言い難い.

JAA 指針では, 前述の幅厚比より大きな幅厚比を持つ板の使用を認めていない. しかし, アルミニウム合金を用いて, 経済的な構造物を設計するためには, 大きな幅厚比を持つ板の耐荷力を与え, その使用を認めるべきである. 米国アルミニウム協会が定めたアルミニウム構造

物の設計基準⁸⁾ (以後, AA 基準と呼ぶ) では座屈強度曲線, 欧州の Eurocode 9⁹⁾ では耐荷力曲線が規定され, 座屈強度または耐荷力が 0.2%耐力を下回る場合に対しても, 座屈強度または耐荷力と幅厚比パラメータの関係が与えられている.

最近, 道路橋用アルミニウム床版の開発が盛んに行なわれている¹⁰⁾¹¹⁾. この床版は, 熱処理アルミニウム合金 A6061S-T6 の中空押出型材を摩擦攪拌接合で突合せ接合することにより製作される¹⁰⁾. 摩擦攪拌接合とは 1991 年に英国の溶接研究所で発明された固相接合法の一種で, 現在, ロケット, 航空機, 自動車, 鉄道車両の製造に使用されている¹²⁾. 図-1 に示すように, 摩擦攪拌接合では, 互いに突合せられた一対のアルミニウム合金板の突合

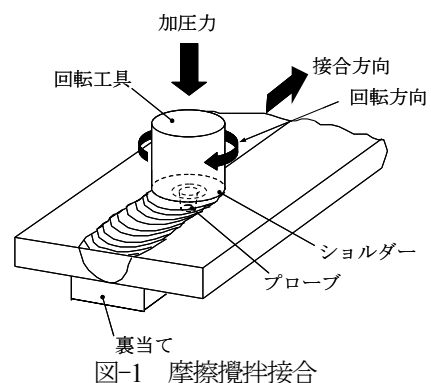


図-1 摩擦攪拌接合

せ面に鋼製の回転工具を挿入し、この回転によって生じる摩擦熱によってアルミニウム合金を塑性流動させ、回転工具を突合せ面に沿って移動させることによってアルミニウム合金板が接合される。摩擦攪拌接合による接合部の疲労強度は、従来の MIG 溶接のそれより格段に高い¹³⁾。このような状況で、今後、アルミニウム部材の製作には MIG 溶接のみならず摩擦攪拌接合も用いられることが考えられる。

MIG 溶接と摩擦攪拌接合では製作方法が異なる。圧縮荷重を受ける I 型断面の柱を製作する場合を例として、MIG 溶接では、一般にウェブの両縁をフランジに隅肉溶接で連結することによって製作されるが、摩擦攪拌接合では、T 型断面の押出形材のウェブの中央を突合せ接合することによって製作される。このように、MIG 溶接では板の両縁に接合位置が存在するが、摩擦攪拌接合では板の中央に接合位置が存在する。

熱処理アルミニウム合金 6000 系の場合、接合部の強度は母材のそれより低下する。したがって、接合位置が板の中央にある場合と板の両縁にある場合とでは耐荷力が異なることが予想される。さらに、接合による残留応力は、接合部では引張応力が生じ、接合部から離れると圧縮応力が生じるので、接合位置が板の中央にある場合と板の両縁にある場合とでは、残留応力が耐荷力に及ぼす影響は異なることが予想される。

AA 基準および Eurocode 9 において、摩擦攪拌接合は未だ考慮されておらず、板の中央で接合された両縁支持板の座屈強度曲線または耐荷力曲線は規定されていない。

以上の研究背景より、本研究では、接合位置を考慮して、圧縮を受ける両縁支持板の耐荷力を明らかにし、その耐荷力曲線を提案することを研究目的とする。

2. 接合方法と接合位置

圧縮荷重を受ける I 型断面のアルミニウム合金柱の製作方法を図-2 に示す。図-2(a)は、I 型断面の押出形材を柱として使用する場合である。押出形材の高さは、押出ダイスの寸法制限を受け、現在、我国で製造できる I 型断面の押出形材の最大高さは約 250mm である¹⁴⁾。この柱は接合をもたない。

250mm より高い柱を製作する場合、図-2(b)と(c)に示すように、MIG 溶接または摩擦攪拌接合 (FSW) が必要になる。図-2(b)は、MIG 溶接を使用する場合であり、ウェブの両縁をフランジに隅肉溶接で連結することによって製作され、ウェブとフランジにはそれぞれ圧延板が用いられる。

図-2(c)は、摩擦攪拌接合を使用する場合であり、T 型断面の押出形材のウェブの中央を突合せ接合することによって製作される。T 型断面の押出形材の高さは、前述したように、押出ダイスの寸法制限を受け約 250mm である。したがって、この製作方法で製作される柱の最大高

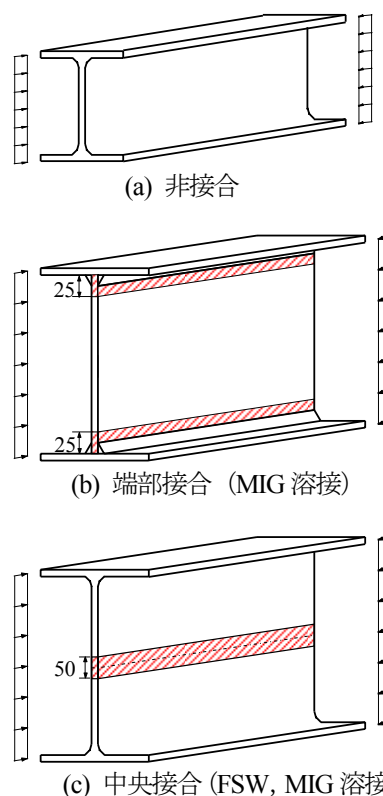


図-2 I 型断面のアルミニウム合金柱の製作方法

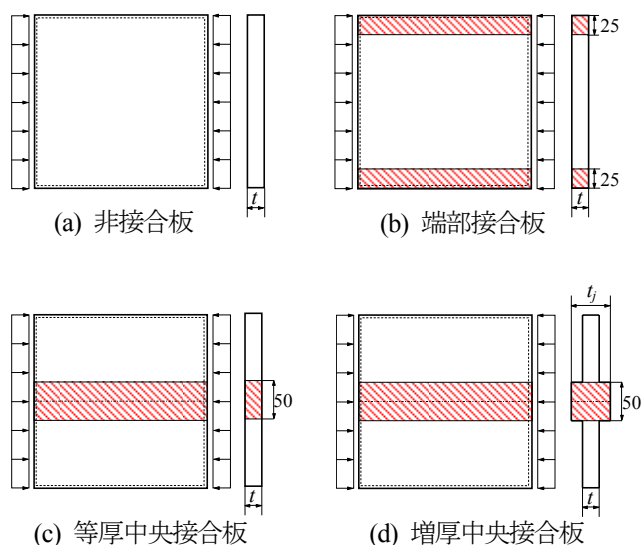


図-3 接合方法と接合位置

さは約 500mm である。図-2(c)は、押出形材と摩擦攪拌接合の組合せによって柱を製作する方法として考案されたものであるが¹⁵⁾、MIG 溶接の使用も可能である。

熱処理アルミニウム合金 6000 系の場合、接合部の強度は母材のそれより低下する。図-2(b)と(c)の斜線が施された部分は強度が低下する範囲であり、その範囲は接合中心から各側 25mm である⁷⁾。

本研究では、前述の I 型断面のアルミニウム合金柱の製作方法を考慮して、図-3 に示す 4 種類の両縁支持板の圧縮耐荷力を調べる。図-3(a), (b), (c)はそれぞれ図

－2(a), (b), (c)の製作方法に対応する．前述したように，6000 系アルミニウム合金の場合，接合部の強度が低下する．そこで図－3(d)は，強度低下を起こす範囲の板厚を厚くすることにより，接合部の強度低下を補うことを考えた両縁支持板である．押出形材では，板の端を部分的に厚くすることは容易である．図－3(d)の接合部の板厚は次式で与えられる．

$$t_j = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{j0.2}} t \quad (1)$$

ここに， t と t_j ：それぞれ母材の板厚と接合部の板厚

$\sigma_{0.2}$ ：母材の 0.2%耐力

$\sigma_{j0.2}$ ：接合部の 0.2%耐力

式(1)で与えられる板厚を接合部に与えることにより，0.2%耐力に対する，接合部の断面強度は母材のそれと同じになる．

3. FEM 解析による弾塑性有限変位解析

3.1 応力－ひずみ関係

アルミニウム合金の応力－ひずみ関係は母材および接合部に対して次式で与えられる⁷⁾．

$$\begin{aligned} \text{[母材]} \quad & \begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & (\sigma \leq \sigma_{0.2}) \\ \sigma = \sigma_{0.2} & (\sigma > \sigma_{0.2}) \end{cases} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{[接合部]} \quad & \begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{j0.2}} \right)^n & (\sigma \leq \sigma_{j0.2}) \\ \sigma = \sigma_{j0.2} & (\sigma > \sigma_{j0.2}) \end{cases} \quad (3) \end{aligned}$$

ここに， σ と ε ：それぞれ応力とひずみ

E ：ヤング係数 (=70GPa)

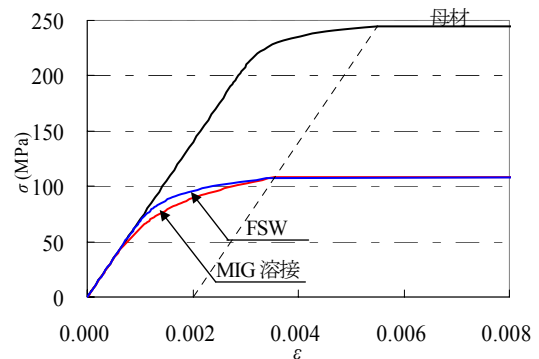
n ：ひずみ硬化パラメータ

母材の 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ ，接合部の 0.2%耐力 $\sigma_{j0.2}$ ，ひずみ硬化パラメータ n の値を表－1 に示す．さらに式(2)と(3)が与える応力－ひずみ関係を図－4 に示す．母材の 0.2%耐力および接合部の 0.2%耐力に対して JAA 指針⁵⁾で規定される値を用いている．JAA 指針で規定される接合部の 0.2%耐力は，MIG 溶接に対するものである．摩擦攪拌接合は MIG 溶接ほど入熱量が大きいので，摩擦攪拌接合部の 0.2%耐力は MIG 溶接部の 0.2%耐力より高いと考えられる．しかし十分なデータがないので，摩擦攪拌接合部の 0.2%耐力に対して，JAA 指針で規定される MIG 溶接に対する値を採用している．

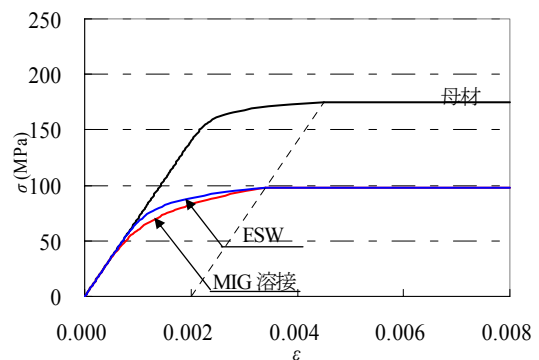
A6061-T6 と A6005C-T5 は熱処理アルミニウム合金であるため，接合中心から各側 25mm の範囲で 0.2%耐力とひずみ硬化パラメータの値が母材のそれらより低下する．A5083-O は非熱処理アルミニウム合金であるため，接合部の 0.2%耐力とひずみ硬化パラメータの値は母材のそれらと同じである．A5083-O の母材の 0.2%耐力は A6061-T6 および A6005C-T5 の母材のそれよりかなり低

表－1 0.2%耐力とひずみ硬化パラメータの値

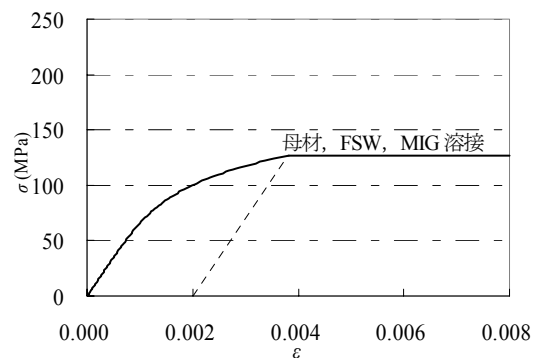
材料	母材		接合部			
	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	n	MIG 溶接		FSW	
	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	n	$\sigma_{j0.2}$ (MPa)	n	$\sigma_{j0.2}$ (MPa)	n
A6061-T6	245	29.1	108	5.3	108	10
A6005C-T5	175	29.1	98	5.3	98	10
A5083-O	127	5.3	127	5.3	127	5.3



(a) A6061-T6



(b) A6005C-T5



(c) A5083-O

図－4 応力－ひずみ関係

い．他方，ひずみ硬化パラメータ n の値は，引張試験の結果に確率統計学的処理が施され，非超過確率 5%に対する値である⁷⁾．

3.2 残留応力

摩擦撹拌接合部および MIG 溶接部の接合線方向の残留応力分布は、接合中心から各側 25mm まで一様な引張残留応力、25mm より離れた位置で一様な圧縮残留応力となる矩形分布でモデル化され、引張残留応力は接合部の 0.2%耐力に近いことが明らかにされている⁷⁾。これを考慮して、接合板に対する残留応力分布に対する仮定を図-5 に示す。

図-5(a)の端部接合板の場合、各縁から 25mm の範囲が、 $\sigma_t = \sigma_{p0.2}$ の引張残留応力であり、それから離れた位置では $\sigma_c = 50 \sigma_{p0.2} / (b - 50)$ の圧縮残留応力である。ここで、 b は板幅であり、単位は mm である。

図-5(b)の等厚中央接合板の場合、中央 50mm の範囲が、 $\sigma_t = \sigma_{p0.2}$ の引張残留応力であり、それから離れた位置では $\sigma_c = 50 \sigma_{p0.2} / (b - 50)$ の圧縮残留応力である。

図-5(c)の増厚中央接合板の場合、中央 50mm の範囲が式(1)で与えられる板厚に増厚され、この範囲に $\sigma_t = \sigma_{p0.2}$ の引張残留応力が発生するので、これにつり合う圧縮残留応力は $\sigma_c = 50 \sigma_{p0.2} / (b - 50)$ になる。

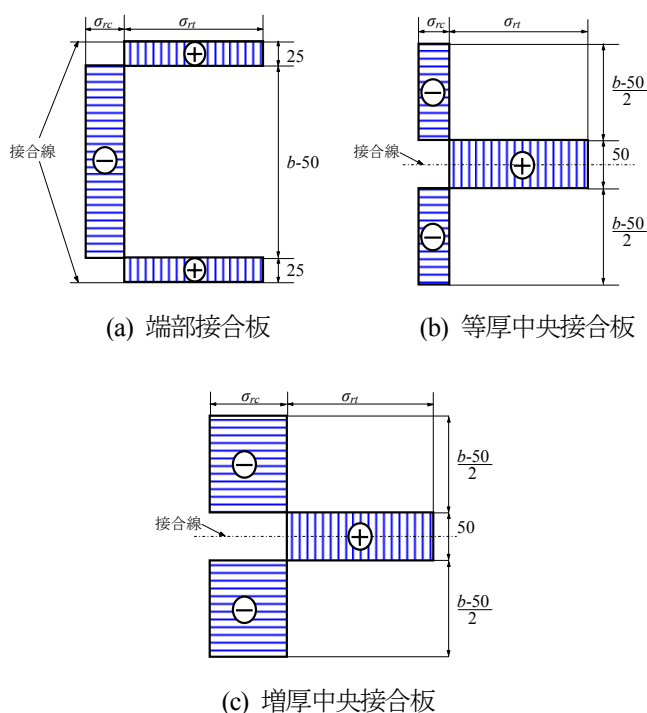


図-5 残留応力分布

3.3 初期たわみ

両縁支持板に対して、次式で与えられる、座屈波形に対応するサイン半波形の初期たわみを仮定する。

$$w_0 = w_{0\max} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (4)$$

ここに、 $w_{0\max}$: 長方形板の中央の最大初期たわみ

a : 荷重の作用方向の長方形板の長さ

b : 荷重の作用直角方向の長方形板の長さ

3.4 要素分割

圧縮荷重を受ける両縁支持板の弾塑性有限変位解析には汎用有限要素解析プログラム MARC¹⁶⁾を使用した。図-6 に示すように、解析対象は、面外方向に周辺単純支持された正方形板 ($a/b=1$) であり、載荷辺に圧縮荷重を強制変位で与え、非載荷辺の面内方向の変位を自由とした。有限要素として 8 節点厚肉シェル要素 (MARC における要素番号 22) を用い、対称条件を用いることにより正方形板の 1/4 の部分を要素分割した。

要素分割数と解析精度の関係を調べるために、図-6 の 1/4 の部分を 8×8 , 12×12 , 20×20 に要素分割して得られる耐荷力を図-7 に示す。これは、アルミニウム合金が A6061-T6 で、 $a = b = 200\text{mm}$ の等厚中央接合板において残留応力を考慮した場合に対する結果である。 σ_u は、FEM 解析において、荷重が増加しなくなったとき載荷辺に生じる反力を断面積で割った値である。 $\sigma_{p0.2}$ は両縁支持板の圧縮強度の上限値、 R_p は $\sigma_{p0.2}$ が用いられた幅厚比パラメータであり、両者とも 4 章で詳述される。接合部の幅は 25mm と一定であるため、接合部の幅方向の要素分割数は、 8×8 , 12×12 , 20×20 の要素分割に対して、それぞれ 2 要素、3 要素、5 要素になる。図-7 からわかるように、 8×8 , 12×12 , 20×20 の要素分割に対する計算結果は一致している。したがって、25mm 幅の接合部の板幅方向の要素分割数は 2 要素で十分であるといえる。

本研究では、5 章と 6 章の FEM 解析において、板幅 b に対して 200mm, 300mm, 500mm を考慮する。したがって、25mm 幅の接合部の板幅方向の要素分割数を 2 要素とすると、これらの板幅の正方形板の 1/4 の部分はそれぞれ 8×8 , 12×12 , 20×20 で要素分割される。

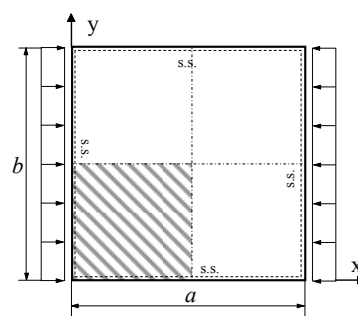


図-6 要素分割

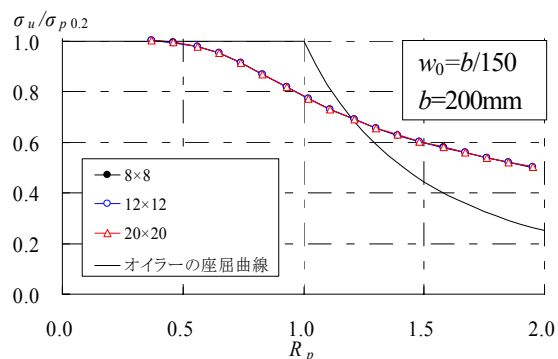


図-7 要素分割数と耐荷力

4. 耐力力表示で使用するパラメータ

3章で述べたように、A6061-T6板とA6005C-T5板の接合部の0.2%耐力は母材のそれより低い。このような両縁支持板の圧縮強度の上限値は次式で与えられる。

$$\sigma_{p0.2} = \frac{A - A_j}{A} \sigma_{0.2} + \frac{A_j}{A} \sigma_{j0.2} \quad (5)$$

ここに、 $\sigma_{p0.2}$ ：両縁支持板の圧縮強度の上限値

A ：板の全断面積

A_j ：接合部の断面積

図-3(b)の端部接合板と図-3(c)の等厚中央接合板に対して、A6061-T6板とA6005C-T5板の圧縮強度の上限値は次式になる。

$$\sigma_{p0.2} = \frac{b - 50}{b} \sigma_{0.2} + \frac{50}{b} \sigma_{j0.2} \quad (6)$$

ここに、 b の単位：mm

図-3(a)の非接合板と図-3(d)の増厚中央接合板に対して、A6061-T6板とA6005C-T5板の圧縮強度の上限値は $\sigma_{0.2}$ である。A5083-O板の場合、接合部の0.2%耐力が母材のそれと同じであるので、図-3(a)の非接合板、図-3(b)の端部接合板、図-3(c)の等厚中央接合板ともに、圧縮強度の上限値は $\sigma_{0.2}$ である。これらの板の圧縮強度の上限値を次式で定義する。

$$\sigma_{p0.2} = \sigma_{0.2} \quad (7)$$

本研究では、両縁支持板の耐力力を無次元表示する際、板の種類に応じて、表-2に示す両縁支持板の圧縮強度の上限値 $\sigma_{p0.2}$ を使用する。

表-2 両縁支持板の圧縮強度の上限値 $\sigma_{p0.2}$

アルミニウム 合金	非接合板	端部 接合板	等厚中央 接合板	増厚中央 接合板
A6061-T6 A6005C-T5	A	B	B	A
A5083-O	A	A	A	—
A： $\sigma_{p0.2} = \sigma_{0.2}$ B： $\sigma_{p0.2} = \frac{b - 50}{b} \sigma_{0.2} + \frac{50}{b} \sigma_{j0.2}$				

両縁支持板の圧縮強度の上限値 $\sigma_{p0.2}$ を用いることにより、幅厚比パラメータは次式で定義される。

$$R_p = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)}{4} \frac{\sigma_{p0.2}}{E}} \beta \quad (8)$$

ここに、 R_p ：圧縮強度 $\sigma_{p0.2}$ を用いた幅厚比パラメータ

μ ：ポアソン比 (=0.3)

β ：幅厚比 (=b/t)

5. A6061-T6板の耐力力

5.1 接合位置の影響

アルミニウム合金A6061-T6の端部接合板、等厚中央接合板および増厚中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_p$ 関係を図-8に示す。等厚中央接合板と増厚中央接合板は摩擦攪拌接合で接合されている。したがって、ひずみ硬化パラメータ n に10を用いている。最大初期たわみ w_{0max} を $b/150$ とし、残留応力を考慮していない。

図-8(a)から分るように、端部接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は非接合板のそれより低下し、板幅が小さくなるほど低下する。これは、板幅が小さくなるほど、板の全断面積に対する接合部の断面積の割合が増加すること、ならびに、板が面外変形を起こした後、荷重に抵抗する板の両縁に0.2%耐力が低下した接合部が位置しているためと考えられる。

図-8(b)から分るように、等厚中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は非接合板のそれより高く、板幅が小さくなるほど上昇する。ただし、等厚中央接合板の σ_u は非接合板のそれより低い。等厚中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が非接合板のそれより高くなるのは、板中央に接合部が位置しているために、板が面外変形を起こしても、接合部の強度低下が板の耐力 σ_u に与える影響が小さいためと考えられる。板幅が大きくなると、板の全断面積に対する接合部の断面積の割合が小さくなるので、板幅が大きくなるに従って、等厚中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は非接合板のそれに近づく。

図-8(c)から分るように、増厚中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は非接合板のそれより高く、板幅が小さくなるほど上昇する。増厚中央接合板の場合、 $\sigma_{p0.2} = \sigma_{0.2}$ である。板中央の接合部の板厚が母材の板厚の2.26倍と厚いので、板の面外変形が抑制され、増厚中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は非接合板のそれより高くなる。

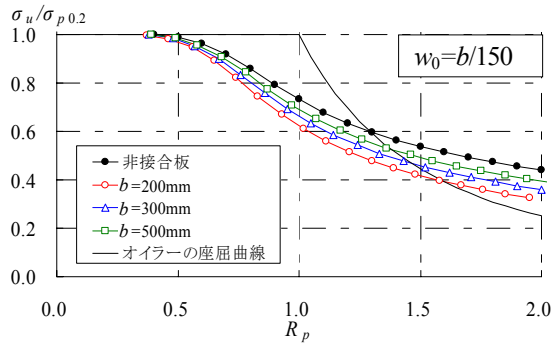
5.2 残留応力の影響

アルミニウム合金A6061-T6の端部接合板、等厚中央接合板および増厚中央接合板に対して、残留応力の有無に対する $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_p$ 関係の比較を図-9に示す。板幅は200mmで、等厚中央接合板と増厚中央接合板は摩擦攪拌接合で接合されている。したがって、ひずみ硬化パラメータ n に10を用いている。最大初期たわみ w_{0max} を $b/150$ としている。

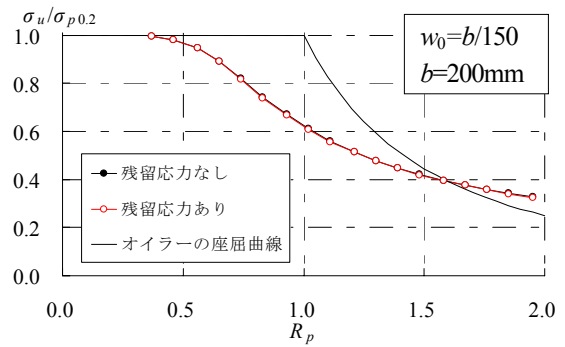
図-9(a)から分るように、端部接合板においては、残留応力の影響はない。

図-9(b)から分るように、等厚中央接合板においては、残留応力が存在する場合の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が、残留応力が存在しない場合のそれよりわずかに高い。これは、等厚中央接合板においては、板の面外変形がまだ小さい、荷重が低い段階において、板中央に存在する引張残留応力によって圧縮応力が相殺されるためであると考えられる。

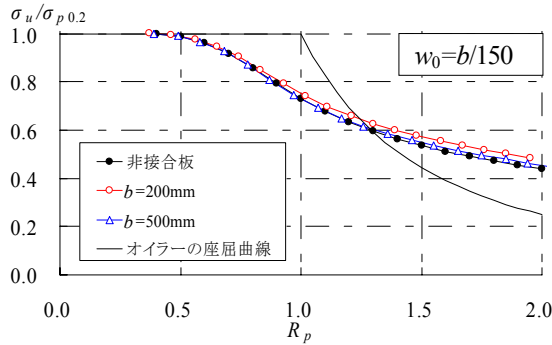
図-9(c)から分るように、増厚中央接合板において、残留応力が $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ に与える影響は、等厚中央接合板より



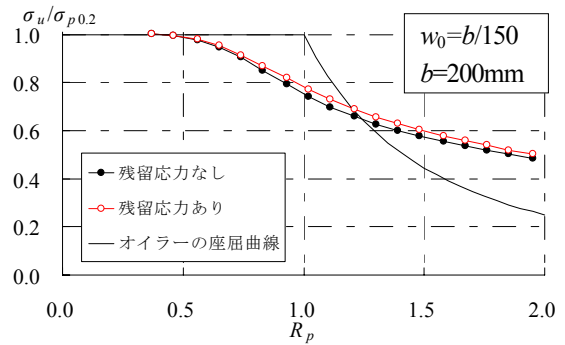
(a) 端部接合板



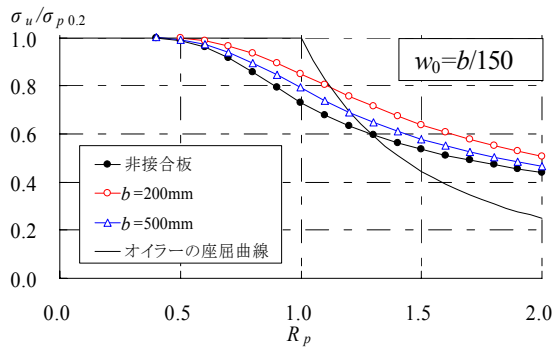
(a) 端部接合板



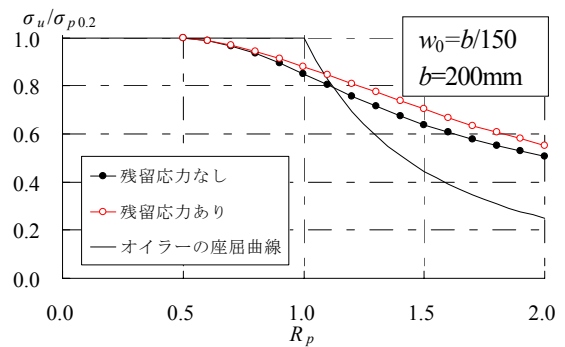
(b) 等厚中央接合板



(b) 等厚中央接合板



(c) 増厚中央接合板



(c) 増厚中央接合板

図-8 接合位置の影響 (A6061-T6)

図-9 残留応力の影響 (A6061-T6)

顕著になる。

5.3 接合方法の違いによる影響

アルミニウム合金 A6061-T6 の等厚中央接合板と増厚中央接合板に対して、摩擦攪拌接合と MIG 溶接による接合方法の違いによる $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_p$ 関係の比較を図-10 に示す。板幅は 300mm で、摩擦攪拌接合のひずみ硬化パラメータ n を 10 とし、MIG 溶接の n を 5.3 としている。最大初期たわみ $w_{0\max}$ を $b/150$ とし、残留応力を考慮していない。

図-10 から分るように、等厚中央接合板および増厚中央接合板ともに、摩擦攪拌接合に対する $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_p$ 関係は MIG 溶接に対するそれにほぼ一致している。したがって摩擦攪拌接合と MIG 溶接の接合方法の違いによって、A6061-T6 の等厚中央接合板および増厚中央接合板の耐

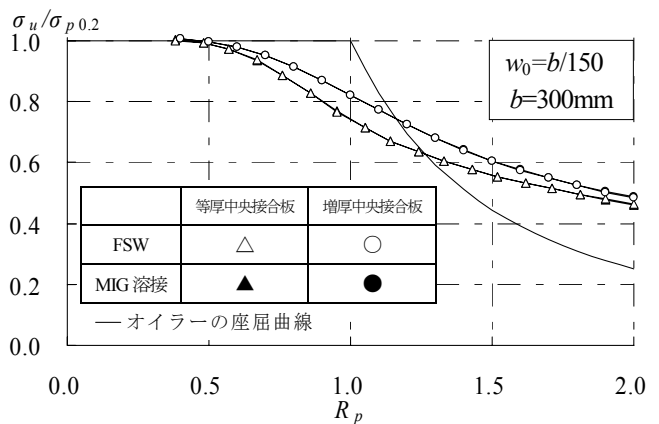
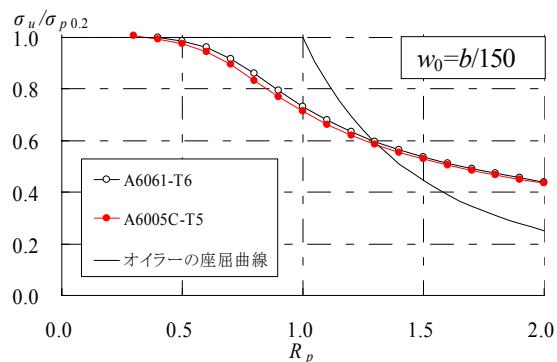
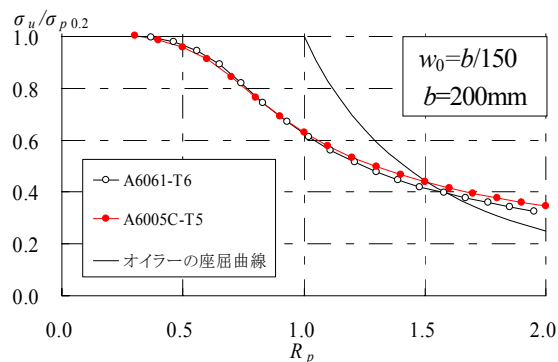


図-10 接合方法の違いによる影響

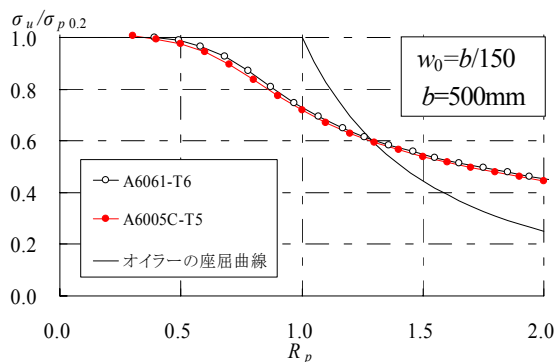
荷力に違いはない。



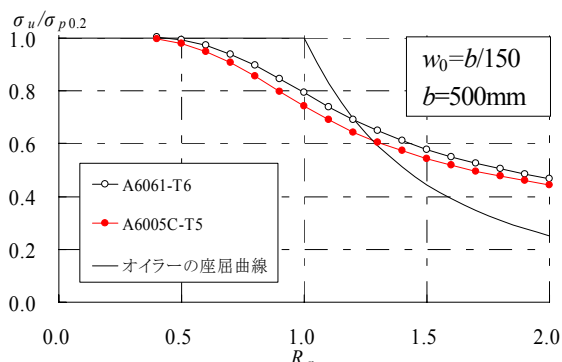
(a) 非接合板



(b) 端部接合板



(c) 等厚中央接合板



(d) 増厚中央接合板

図-11 A6005C-T5 板と A6061-T6 板の耐荷力の比較

5.4 A6005C-T5 板と A6061-T6 板の耐荷力の比較

非接合板，端部接合板，等厚中央接合板および増厚中央接合板の各場合に対して，A6005C-T5 板と A6061-T6 板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_p$ 関係の比較を図-11 に示す．最大初期たわみ $w_{0\max}$ を $b/150$ とし，残留応力を考慮していない．図-8 に示したように，端部接合板，等厚中央接合板および増厚中央接合板の各場合において，耐荷力が最も低下する板幅，すなわち，端部接合板では 200mm，等厚中央接合板および増厚中央接合板では 500mm の板幅に対して計算を行なっている．

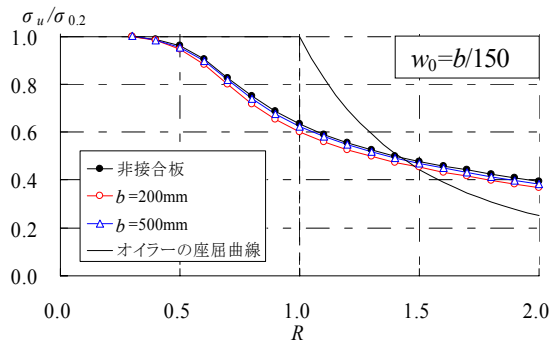
図-11(a)，(b)，(c)から分るように，非接合板，端部接合板および等厚中央接合板においては，A6005C-T5 板と A6061-T6 板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_p$ 関係はほぼ一致している．図-11(d)から分るように，増厚中央接合板では A6005C-T5 板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が A6061-T6 板のそれより低い．式(1)から計算される母材の板厚に対する増厚部の板厚が，A6061-T6 板では 2.26 倍，A6005C-T5 板では 1.78 倍である．したがって，A6005C-T5 板の増厚部の板厚が A6061-T6 板の増厚部の板厚より薄いことが，A6005C-T5 板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が A6061-T6 板のそれより低くなる原因と考えられる．

6. A5083-O 板の耐荷力

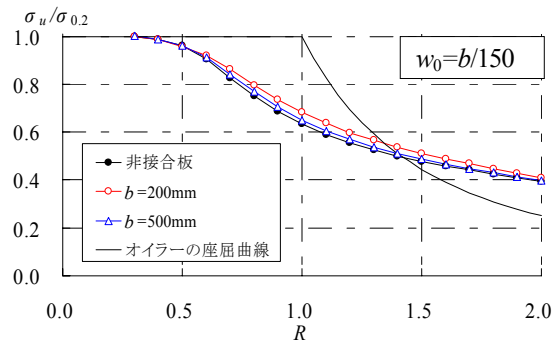
アルミニウム合金 A5083-O の端部接合板と等厚中央接合板の各場合に対して， $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_p$ 関係を図-12 に示す．最大初期たわみ $w_{0\max}$ を $b/150$ とし，残留応力を考慮している．

図-12(a)から分るように，端部接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は残留応力の影響により，非接合板のそれより幾分低下する．さらに，板幅 200mm に対する $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が板幅 500mm に対するそれより低い．これは，板幅が小さいほど，板中央の圧縮残留応力が大きくなるためである．

図-12(b)から分るように，等厚中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は，残留応力の影響により，非接合板のそれより上昇する．これは，等厚中央接合板においては，板中央に存在する引張残留応力によって圧縮応力が相殺されるためと考えられる．さらに，板幅 200mm に対する $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が板幅 500mm に対するそれより高い．これは，板幅が小さくなるほど，板の全断面積に対する引張残留応力が存在する断面積の割合が増加するので，板幅が小さくなるに従って引張残留応力の影響が大きくなるためと考えられる．



(a) 端部接合板



(b) 等厚中央接合板

図-12 A5083-O 板の耐荷力

7. 耐荷力曲線

7.1 耐荷力の定式化

図-8～12 から分るように、A6061-T6、A6005C-T5 および A5083-O の両縁支持板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_p$ 関係は、 R_p のある値で $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=1.0$ に交差し、 $0.6 < \sigma_u/\sigma_{p0.2} < 1.0$ ではほぼ直線、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2} < 0.6$ で下向きの曲線になる。そこで両縁支持板の耐荷力曲線を表す式として、次式を採用する。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{p0.2}} = \begin{cases} 1 & (R_p \leq R_{cr}) \\ 1 - 0.4 \frac{R_p - R_{cr}}{R_{0.6} - R_{cr}} & (R_{cr} \leq R_p \leq R_{0.6}) \\ 0.6 \left(\frac{R_{0.6}}{R_p} \right)^m & (R_{0.6} \leq R_p) \end{cases} \quad (13)$$

ここに、 R_{cr} : 耐荷力曲線が $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=1.0$ に交差する幅厚比パラメータの値

$R_{0.6}$: $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=0.6$ に対する R_p の値

m : 定数

$0.6 < \sigma_u/\sigma_{p0.2} < 1.0$ の FEM 解析値に直線を仮定し、これに最小 2 乗法を適用して得られる直線式を式(13)の中段の式の形式に変形して R_{cr} および $R_{0.6}$ の値を求めた。

$\sigma_u/\sigma_{p0.2} < 0.6$ の FEM 解析値に対して、式(13)の下段の式を

仮定し、これに最小 2 乗法を適用して m の値を求めた。A6061-T6 板、A6005C-T5 板および A5083-O 板に対する、 R_{cr} 、 $R_{0.6}$ 、 m の値を表-3 に示す。考慮した最大初期たわみ w_{0max} は、JAA 指針⁵⁾で規定される $b/150$ および Eurocode 9⁹⁾で考慮されていると考えられる $b/200$ と $b/1000$ である^{17),18)}。式(13)は FEM 解析値にほぼ一致することを確認している¹⁹⁾。表-3 の耐荷力曲線の区分について次に述べる。

5.2 節で述べたように、A6061-T6 の等厚中央接合板および増厚中央接合板においては、残留応力の影響により耐荷力が上昇する。さらに、5.1 節で述べたように、A6061-T6 の非接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は、等厚中央接合板および増厚中央接合板のそれより低いので、等厚中央接合板および増厚中央接合板の耐荷力曲線として、非接合板の耐荷力曲線を採用している。図-8 において黒丸で示される、非接合板の FEM 解析値を式(13)で近似して得られる R_{cr} 、 $R_{0.6}$ 、 m の値が、表-3 の非接合板、等厚中央接合板および増厚中央接合板に対して、 $b/150$ の行に記載されている。 $w_{0max} = b/200$ 、 $b/1000$ の最大初期たわみに対して、これらの最大初期たわみを有する非接合板の FEM 解析を新たに実施し、同様に得られる R_{cr} 、 $R_{0.6}$ 、 m の値が表-3 に記載されている。

5.2 節で述べたように、A6061-T6 の端部接合板におい

表-3 R_{cr} 、 $R_{0.6}$ 、 m の値

アルミニウム 合金	w_{0max}	非接合板			端部接合板								
		等厚中央接合板 増厚中央接合板*			200 ≤ b < 300			300 ≤ b < 500			500 ≤ b		
		R_{cr}	$R_{0.6}$	m	R_{cr}	$R_{0.6}$	m	R_{cr}	$R_{0.6}$	m	R_{cr}	$R_{0.6}$	m
A6061-T6 A6005C-T6	b/150	0.52	1.26	0.67	0.50	1.02	0.95	0.50	1.11	0.88	0.52	1.15	0.76
	b/200	0.57	1.29	0.69	0.52	1.07	1.00	0.55	1.13	0.89	0.56	1.19	0.80
	b/1000	0.76	1.35	0.72									
A5083-O	b/150	0.44	1.05	0.64	0.42	0.98	0.67						
	b/200	0.48	1.07	0.65	0.47	1.00	0.69	0.47	1.03	0.69	0.47	1.06	0.69
	b/1000	0.68	1.16	0.73									

b : 板幅 (mm)

* : 増厚中央接合板は A5083-O には適用されない。

ては、残留応力の影響はない。そして、図-8(a)に示すように、A6061-T6 の端部接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は、非接合板のそれより低く、板幅によって異なる。したがって、板幅を ①: $200 \leq b < 300$, ②: $300 \leq b < 500$, ③: $500 \leq b$ の三つに区分し、①, ②, ③に対して、それぞれ図-8(a)の板幅 200mm, 300mm, 500mm の FEM 解析値を適用している。さらに、 $w_{0max}=b/200$ の最大初期たわみに対して、板幅 200mm, 300mm, 500mm について FEM 解析を新たに実施した。

5.4 節で述べたように、A6005C-T5 の非接合板、端部接合板および等厚中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_p$ 関係は、A6061-T6 板のそれらとほぼ一致している。A6005C-T5 の増厚中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_p$ 関係は A6061-T6 板のそれより下側に位置しているが、A6005C-T5 の非接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_p$ 関係を下回ることはない。したがって、A6005C-T5 板は A6061-T6 板と同じ区分になっている。

図-12(b)に示すように、A5083-O の等厚中央接合板では、非接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が最も低いので、これを耐力力曲線に採用している。図-12(a)に示すように、端部接合板では、板幅 200mm の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が最も低いので、これを耐力力曲線に採用している。さらに 7.2 節で述べる Eurocode 9⁹⁾の耐力力曲線との比較のために、 $w_{0max}=b/200$ の最大初期たわみに対して、板幅 200mm, 300mm, 500mm について FEM 解析を新たに実施した。

1 章で述べたように、JAA 指針⁵⁾の圧縮を受ける両縁支持板に対する幅厚比の規定では、幅厚比パラメータの値が 0.7 に固定されており、この幅厚比以下の幅厚比を持つ板の耐力力は 0.2%耐力を保持していると想定している。しかし、表-3 から分るように、アルミニウム合金 A6061-T6 と A6005C-T5 に対して、 $w_{0max}=b/150$ に対する幅厚比パラメータ R_{cr} の値は 0.50 または 0.52 であり、A5083-O に対するそれは 0.42 または 0.44 である。これらの値は JAA 指針の規定値 0.7 よりかなり低いので、JAA 指針の規定値 0.7 は見直す必要があると考える。

7.2 Eurocode 9 の耐力力曲線との比較

Eurocode 9⁹⁾において、両縁支持板に対して次の耐力力曲線が規定されている。

$$\frac{\sigma}{\sigma_{p0.2}} = \begin{cases} 1 & (0 \leq R_p \leq R_{cr}) \\ \frac{Q_1}{R_p} - \frac{Q_2}{R_p^2} & (R_{cr} \leq R_p) \end{cases} \quad (14)$$

ここに、 Q_1, Q_2 : 定数

耐力力曲線の分類ならびに Q_1, Q_2, R_{cr} の値を表-4 に示す。Eurocode 9 においては、非接合板および MIG 溶接によって製作された端部接合板に対して耐力力曲線が与えられている。この耐力力曲線で考慮された最大初期たわみは、非接合板に対して $b/1000$ 、端部接合板に対して $b/200$ であろうと推定される^{17),18)}。

熱処理アルミニウム合金 (6000 系アルミニウム合金) に対する Eurocode 9 の耐力力曲線と式(13)が与える耐力力曲線の比較を図-13 に示す。非接合板に対して、表-3 の A6061-T6 および A6005C-T5 の $b/1000$ に対する値を式(13)に用いている。他方、端部接合板に対して、表-3 の A6061-T6 および A6005C-T5 の $b/200$ に対する値を用いている。

図-13(a)から分るように、非接合板においては、式(13)が与える耐力力曲線は Eurocode 9 の耐力力曲線 EA に近い。図-13(b)から分るように、端部接合板においては、 $500 \leq b$ に対する式(13)が与える耐力力曲線が Eurocode 9 の耐力力曲線 EB に近いが、 $200 \leq b < 300$ に対する式(13)が与える耐力力曲線は Eurocode 9 の耐力力曲線 EB よりかなり下にある。これは、Eurocode 9 では、熱処理アルミニウム合金の端部接合板の耐力力に、板幅の影響が考慮されていないことを示している。

非熱処理アルミニウム合金 (5000 系アルミニウム合金) に対する Eurocode 9 の耐力力曲線と式(13)が与える耐力力曲線の比較を図-14 に示す。非接合板に対して、表-3 の A5083-O の $b/1000$ に対する値を式(13)に用い、端部接合板に対して、表-3 の A5083-O の $b/200$ の端部接合板 $500 \leq b$ に対する値を式(13)に用いている。図-14 から分るように、非接合板、端部接合板ともに、式(13)が与える耐力力曲線は Eurocode 9 の耐力力曲線に近い。

7.3 耐力力曲線の提案

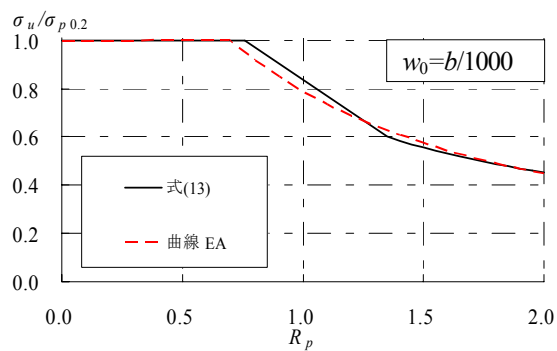
本研究では表-5 に示す耐力力曲線を提案する。表-3 において最大初期たわみ w_{0max} が $b/150$ に対する $R_{cr}, R_{0.6}, m$ の値が表-5 に用いられている。表-5 の値が代入された式(13)が与える耐力力曲線を図-15 に示す。

Eurocode 9⁹⁾では、非接合板および端部接合板に対して耐力力曲線が規定されているが、本研究では、これらに加えて等厚中央接合板および増厚中央接合板の耐力力曲線も考慮されている。

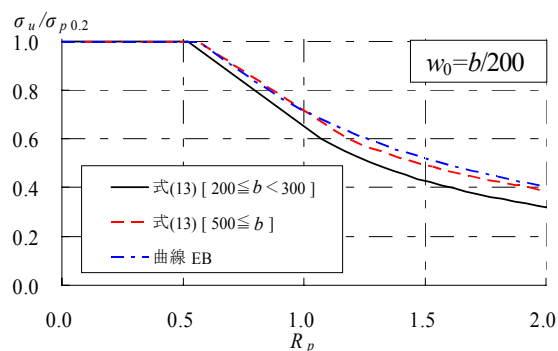
熱処理アルミニウム合金の端部接合板では板幅の大きさによって耐力力が異なるので、本研究では板幅を 3 つに区分して耐力力を与えている。

表-4 Eurocode 9 における耐力力曲線の分類および Q_1, Q_2, R_{cr} の値

板の区分	熱処理アルミニウム合金 (6000 系アルミニウム合金)	非熱処理アルミニウム合金 (5000 系アルミニウム合金)	記号	Q_1	Q_2	R_{cr}
非接合板	EA	EB	EA	1.006	0.217	0.691
端部接合板	EB	EC	EB	0.911	0.196	0.566
			EC	0.786	0.148	0.471

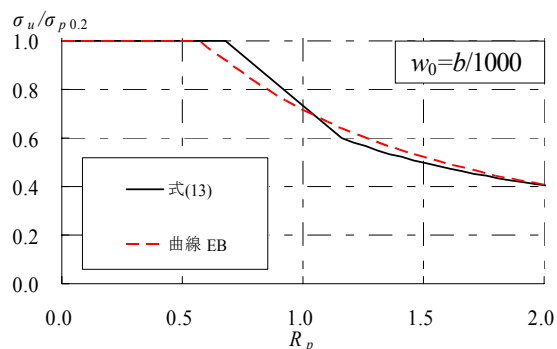


(a) 非接合板

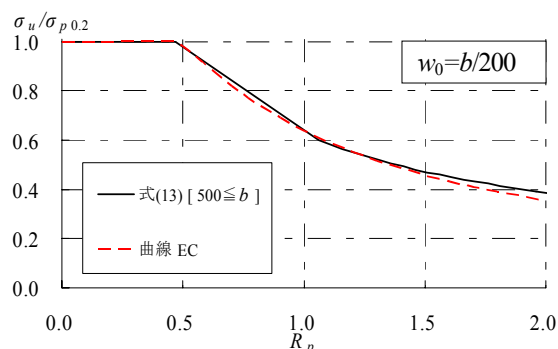


(b) 端部接合板

図-13 熱処理アルミニウム合金に対する Eurocode 9 の耐荷力曲線と式(13)の比較



(a) 非接合板



(b) 端部接合板

図-14 非熱処理アルミニウム合金に対する Eurocode 9 の耐荷力曲線と式(13)の比較

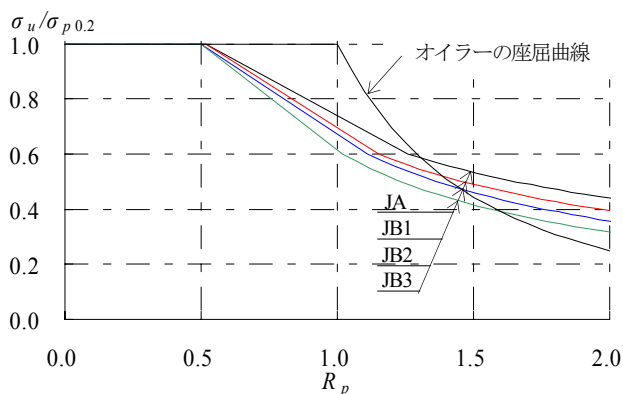
表-5 提案された耐荷力曲線の分類および R_{cr} , $R_{0.6}$, m の値

材料	非接合板 等厚中央接合板 増厚中央接合*	端部接合		
		$200 \leq b < 300$	$300 \leq b < 500$	$500 \leq b$
A6061-T6 A6005C-T5	JA	JB3	JB2	JB1
A5083-O	JC	JD		

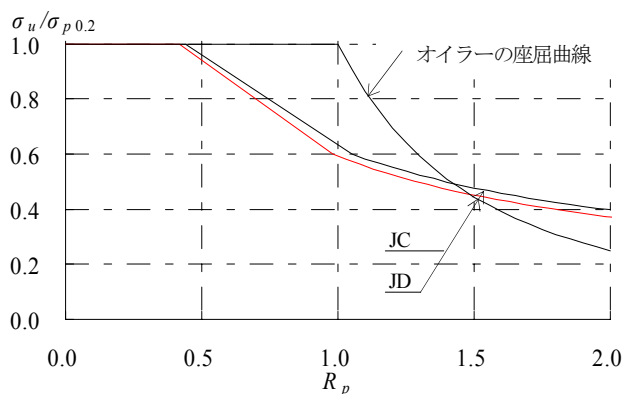
b : 板幅 (mm)

*: 増厚中央接合板は A5083-O には適用されない。

記号	R_{cr}	$R_{0.6}$	m
JA	0.52	1.26	0.67
JB1	0.52	1.15	0.76
JB2	0.50	1.11	0.88
JB3	0.50	1.02	0.95
JC	0.44	1.05	0.64
JD	0.42	0.98	0.67



(a) A6061-T6 と A6005C-T5



(b) A5083-O

図-15 提案された耐荷力曲線

8. 結論

本研究では、接合位置を考慮して、圧縮を受ける両縁支持板の耐荷力を FEM による弾塑性有限変位解析によって明らかにした。考慮したアルミニウム合金は、熱処理アルミニウム合金 A6061-T6, A6005C-T5 および非熱処理アルミニウム合金 A5083-O である。本研究で得られた主な結論は次の通りである。

- (1) A6061-T6 の端部接合板の、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ (4 章参照) で表された耐荷力は非接合板のそれより低く、板幅が小さくなるほど低下する。等厚中央接合板および増厚中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は非接合板のそれより高く、板幅が小さくなるほど上昇する。
- (2) A6061-T6 の端部接合板では残留応力が耐荷力に与える影響はない。等厚中央接合板および増厚中央接合板では残留応力の影響により耐荷力が上昇する。
- (3) A6061-T6 の等厚中央接合板および増厚中央接合板において、摩擦攪拌接合と MIG 溶接の接合方法の違いによって耐荷力の違いはない。
- (4) 非接合板、端部接合板および等厚中央接合板においては、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ 表示の、A6005C-T5 板と A6061-T6 板の耐荷力はほぼ等しい。増厚中央接合板では、A6005C-T5 板の増厚部の板厚が A6061-T6 板のそれより薄いため、A6005C-T5 板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ 表示の耐荷力が A6061-T6 板のそれより低くなる。
- (5) A5083-O の端部接合板の耐荷力は残留応力により、非接合板のそれより幾分低下する。等厚中央接合板の耐荷力は残留応力の影響により、非接合板のそれより上昇する。
- (6) 幅厚比パラメータ R_{cr} (耐荷力曲線が $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=1.0$ に交差する幅厚比パラメータの値) の値は、A6061-T6 と A6005C-T5 に対して 0.50 または 0.52 であり、A5083-O に対して 0.42 または 0.44 である。したがって幅厚比パラメータの値が 0.7 に固定されている JAA 指針⁵⁾の規定値は見直しが必要である。
- (7) Eurocode 9⁹⁾で規定される熱処理アルミニウム合金の端部接合板の耐荷力には、板幅の影響が考慮されていない可能性がある。200mm から 300mm の板幅の耐荷力は Eurocode 9 で規定される耐荷力より低い。
- (8) 本研究の成果に基づいて、耐荷力曲線を式(13)の形式で与え、表-5 で分類される耐荷力曲線を提案した。

参考文献

- 1) 大倉一郎, 萩澤亘保, 岩田節雄, 北村幸嗣: アルミニウム橋実現のための技術開発, 軽金属, 第 54 巻, 第 9 号, pp.380-387, 2004.
- 2) 塚本健三, 末廣本治, 中林章, 大隅心平: アルミニウム合金製橋梁-JR 川棚駅前広場自由通路橋, 橋梁 & 都市 PROJECT, 第 38 巻, 第 6 号, pp.4-8, 2002.
- 3) 島貫繁吉, 山口進吾: 資源循環型床版の施工ーリサ

イクル材を利用したアルミニウム合金製床版, 橋梁 & 都市 PROJECT, 第 37 巻, 第 11 号, pp.5-11, 2001.

- 4) 山田雅義, 武本頼和: アルミ床板による新加古川大橋幅について, 大阪大学, 阪大フロンティア研究機構, 第 1 回アルミニウム合金構造物実現のためのシンポジウム, pp.26-27, 2004.
- 5) 日本アルミニウム協会(旧軽金属協会): アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案 (第 1 次改訂試案), 1998.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 2002.
- 7) 大倉一郎, 長尾隆史, 石川敏之, 萩澤亘保, 大隈心平: 構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係および接合によって発生する残留応力の定式化, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.789-805, 2008.
- 8) The Aluminum Association: Specifications for Aluminum Structures, 2000.
- 9) Eurocode 9 : Design of Aluminum Structures – Part 1-1: General rules – General rules and rules for buildings, 1999.
- 10) 大倉一郎, 岡田理, 萩澤亘保, 大澤章吾: 開閉断面のアルミニウム床版の開発, 構造工学論文集, Vol. 51A, pp.1219-1227, 2005.
- 11) 大倉一郎, 石川敏之, 筒井将仁, 大澤章吾: トラックタイヤの接地形状がアルミニウム床版の板曲げ応力に与える影響, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 4, pp.655-666, 2007.
- 12) 大倉一郎, 萩澤亘保, 花崎昌幸: アルミニウム構造学入門, 東洋書店, 2006.
- 13) 萩澤亘保, 大倉一郎: アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦攪拌接合部の疲労強度に応力比が与える影響, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 1, pp.117-122, 2009.
- 14) アルミニウム橋研究会: 構造用アルミニウム合金材, http://alst.jp/pdf/aluminum_str_2.pdf
- 15) 小笠原康二, 大倉一郎: 初期たわみと残留応力がアルミニウム合金板の耐荷力に与える影響, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 論文番号 I-358, 2008.
- 16) 日本マーク: MARC, K6, 2005.
- 17) Mazzolani, F.M.: Aluminium Alloy Structures, Second Edition, E&FN SPON, pp.505-507, 1995.
- 18) Mazzolani, F.M., Landolfo, R. and Matteis, G.D.: Influence of welding on the stability of aluminium thin plates, Stability and Ductility of Steel Structures, Edited by Usamai, T. & Itoh, Y., Elsevier, pp.225-232, 1998.
- 19) 大倉一郎, 小笠原康二: 接合位置を考慮したアルミニウム合金板の圧縮耐荷力, ALST 研究レポート 10, 2009.

(2009 年 9 月 24 日受付)