

アルミニウム合金板の耐荷力

大倉 一郎¹

¹正会員 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)

要旨

本論文では、圧縮を受ける両縁支持板と片縁支持板の耐荷力、および面内曲げを受ける両縁支持板の耐荷力について述べる。考慮する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。摩擦攪拌接合および MIG 溶接によって生じる接合部の強度低下および残留応力を考慮して、FEM による弾塑性有限変位解析によって耐荷力を算出する。接合位置と板幅が耐荷力に大きく影響することを明らかにするとともに、耐荷力曲線を与える。

キーワード：アルミニウム合金板、摩擦攪拌接合、MIG 溶接、耐荷力、弾塑性有限変位解析

1. 序論

2000年頃から、アルミニウム歩道橋および歩道用アルミニウム床版が建設されるようになってきた¹⁾。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²⁾ (以後、JAA指針と呼ぶ) に従ってなされる。JAA指針の、圧縮または面内曲げを受ける両縁支持板に対する幅厚比の規定および圧縮を受ける片縁支持板に対する幅厚比の規定は、道路橋示方書³⁾の規定に準拠し、鋼のヤング係数と降伏応力を、それぞれ、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って与えられている。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⁴⁾。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。

他方、近年、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^{1),5)}。この床版は、熱処理アルミニウム合金A6061-T6の中空押出型材を摩擦攪拌接合 (FSW) で突合せ接合することによって製作される。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、橋梁幅歩行者用アルミニウム床版の製造に使用されている^{1),6)}。図-1に示すように、摩擦攪拌接合では、互いに突合せされた一対のアルミニウム合金板の突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た後、アルミニウム合金が冷却す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⁷⁾。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であろう。

MIG溶接と摩擦攪拌接合では製作方法が異なる。圧縮荷重または曲げ荷重を受けるI型断面部材を製作する場合、2. (1)および4. (1)で述べるように、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内側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、接合部の強度が母材のそれより低下する。したがって、接合位

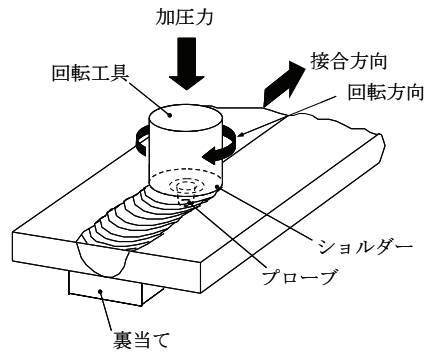


図-1 摩擦攪拌接合

置が板の内側にある場合と板の両縁にある場合とでは、圧縮または面内曲げを受ける両縁支持板の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、接合位置が板の内側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。

他方、接合部で強度が低下する範囲は、接合中心から最大で各側25mmである⁴⁾⁶⁾。したがって、接合部の幅に対する板幅の大きさに依存して、接合部が耐荷力に及ぼす影響は異なることが予想される。

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⁹⁾および欧州のEurocode 9⁹⁾において、摩擦攪拌接合は未だ考慮されておらず、板の内側で接合された、圧縮または面内曲げを受ける両縁支持板の耐荷力に関する規定はない。

本論文では、圧縮を受ける両縁支持板と片縁支持板の耐荷力^{10),11)}、および面内曲げを受ける両縁支持板の耐荷力¹²⁾について述べる。

2. 圧縮を受ける両縁支持板¹⁰⁾

(1) 接合方法と接合位置

圧縮荷重を受ける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型断面の押出型材を柱として使用する場合である。押出型材の高さは、押出ダイスの寸法制限を受け、現在、我国で製造できるI型断面の押出型材の最大高さは約250mmである¹³⁾。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型断面の押出型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型断面の押出型材の高さは、押出ダイスの寸法制限を受け、その最大高さは約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さは約500mmである。図-2(c)は、摩擦攪拌接合の代わりにMIG溶接の使用も可能である。

6000系の熱処理アルミニウム合金の場合、接合部の強度が低下する。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を示し、その範囲は接合中心から最大で各側25mmである⁴⁾⁶⁾。

本章では、図-3に示す、4種類の両縁支持板に対して、その圧縮耐荷力を与える。図-3(a), (b), (c)はそれぞれ図-2(a), (b), (c)のウェブに対応する。6000系アルミニウム合金の場合、接合部が強度低下を起こす。したがって、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両縁支持板である。押出型材では、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。

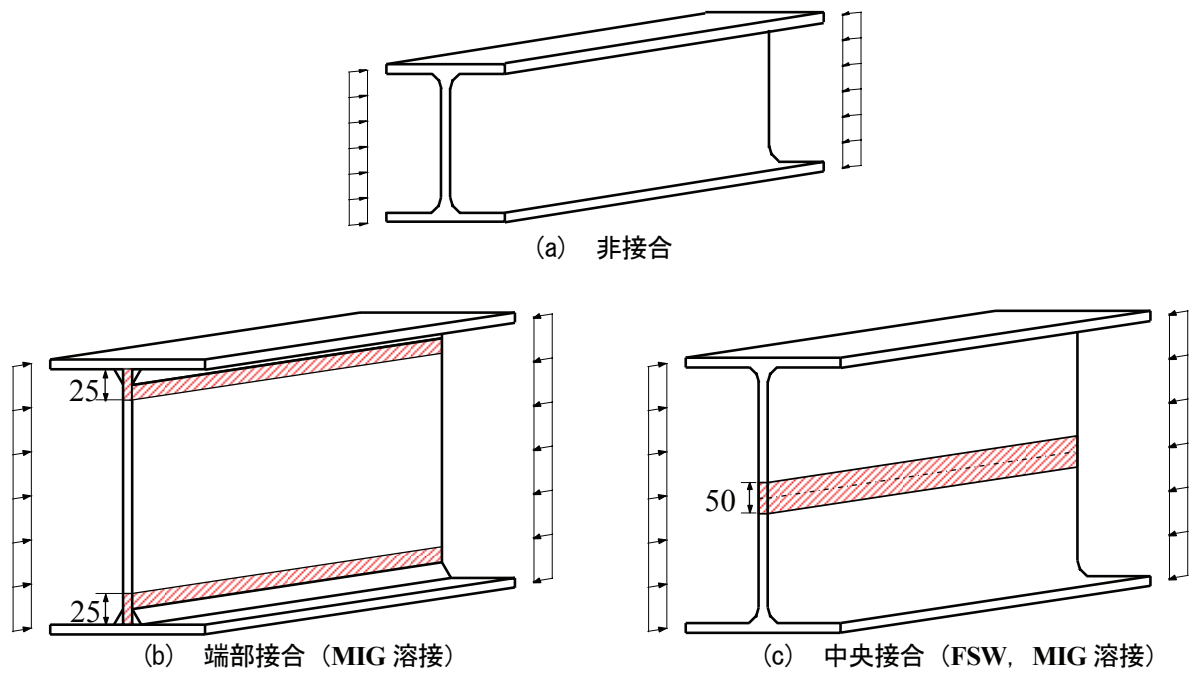


図-2 圧縮荷重を受けるアルミニウム合金柱の製作方法

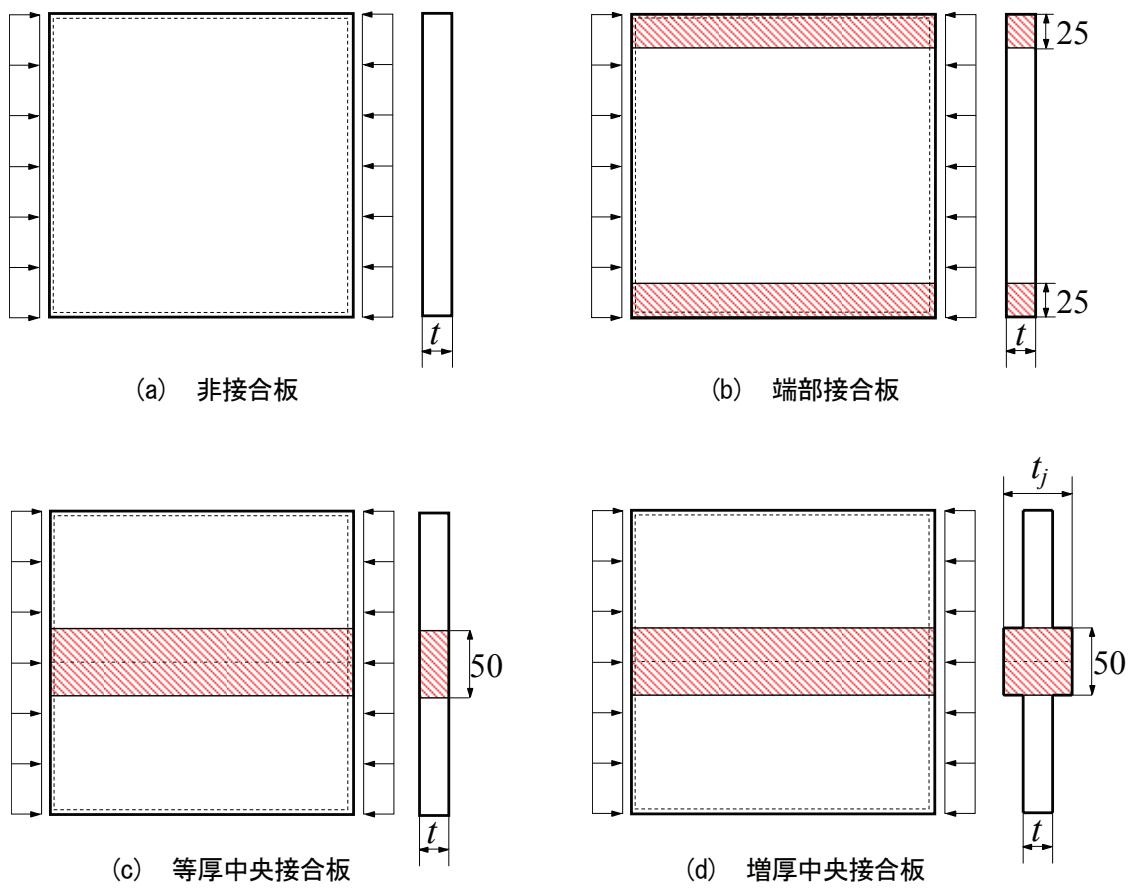


図-3 圧縮を受ける両縁支持板

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

ここに、 t_j : 接合部の板厚
 t : 母材の板厚
 $\sigma_{0.2}$: 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。

(2) FEMによる弾塑性有限変位解析

a) 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それぞれ次式で与えられる⁴⁾。

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

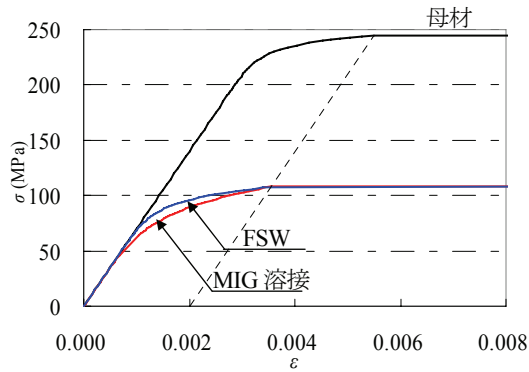
$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} & (\sigma \leq \sigma_{j0.2}) \\ \sigma = \sigma_{j0.2} & (\sigma > \sigma_{j0.2}) \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 ε と σ : それぞれひずみと応力
 E : ヤング係数 (=70GPa)
 n と n_j : それぞれ母材と接合部のひずみ硬化パラメータの値

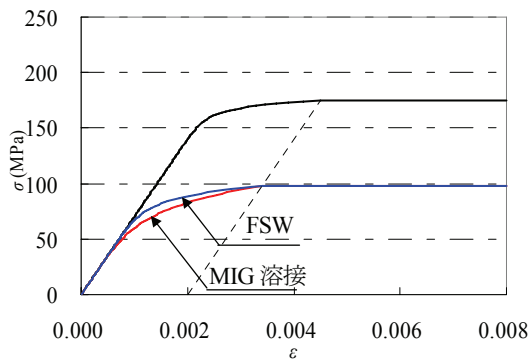
0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ と $\sigma_{j0.2}$ 、およびひずみ硬化パラメータ n と n_j の値を表-1に示す。さらに式(2)と(3)が与える応力-ひずみ関係を図-4に示す。母材の0.2%耐力および接合部の0.2%耐力に対してJAA指針²⁾で規定される値を用いている。JAA指針で規定される接合部の0.2%耐力は、MIG溶接に対するものである。摩擦攪拌接合はMIG溶接ほど入熱量が大きくないので、摩擦攪拌接合部の0.2%耐力はMIG溶接部の0.2%耐力より一般に高い⁴⁾。しかし十分なデータがないので、摩擦攪拌接合部の0.2%耐力に対して、JAA指針で規定されるMIG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。

表-1 0.2%耐力およびひずみ硬化パラメータの値

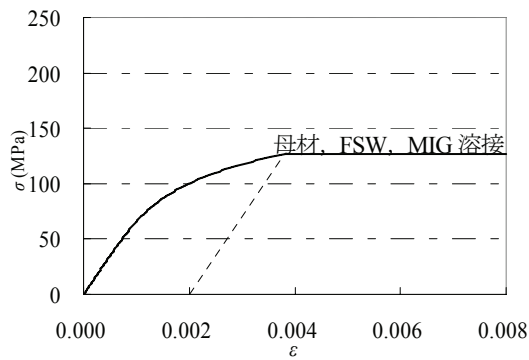
アルミニウム合金	母材		接合部			
			MIG 溶接		摩擦攪拌接合	
	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	n	$\sigma_{j0.2}$ (MPa)	n_j	$\sigma_{j0.2}$ (MPa)	n_j
A6061-T6	245	29.1	108	5.3	108	10
A6005C-T5	175	29.1	98	5.3	98	10
A5083-O	127	5.3	127	5.3	127	5.3



(a) A6061-T6



(b) A6005C-T5



(c) A5083-O

図-4 応力-ひずみ関係

b) 解析対象

解析対象は、面外方向に周辺単純支持された正方形板である。载荷辺に圧縮荷重を強制変位で与え、非载荷辺の面内方向の変位を自由とする。弾塑性有限変位解析には汎用有限要素解析プログラムMARC¹⁴⁾を使用し、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）を用いる。

c) 初期たわみと残留応力

両縁支持された長方形板に対して、次式で与えられるサイン半波形の初期たわみを仮定する。

$$w_0 = \frac{b}{150} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (4)$$

ここに、 w_0 : 初期たわみ

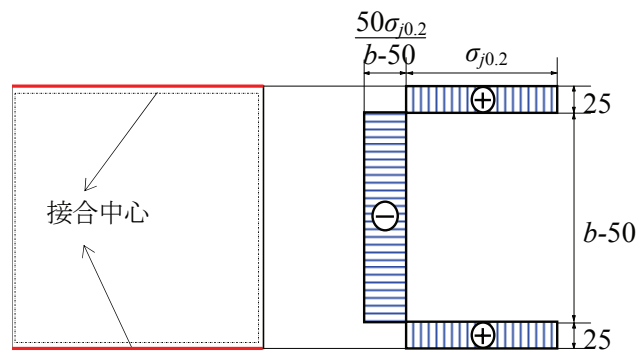
- a : 荷重の作用方向の長方形板の長さ
 b : 荷重の作用直角方向の長方形板の長さ

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⁴⁾。これを考慮して、接合板の残留応力分布に対する仮定を図-5に示す。

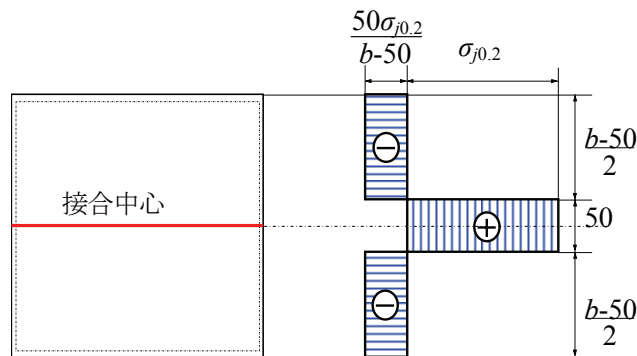
図-5(a)の端部接合板の場合、各縁から25mmの範囲が、 $\sigma_{j0.2}$ の引張残留応力であり、それから離れた位置では $50\sigma_{j0.2}/(b-50)$ の圧縮残留応力である。ここで、 b は板幅であり、単位はmmである。

図-5(b)の等厚中央接合板の場合、中央50mmの範囲が、 $\sigma_{j0.2}$ の引張残留応力であり、それから離れた位置では $50\sigma_{j0.2}/(b-50)$ の圧縮残留応力である。

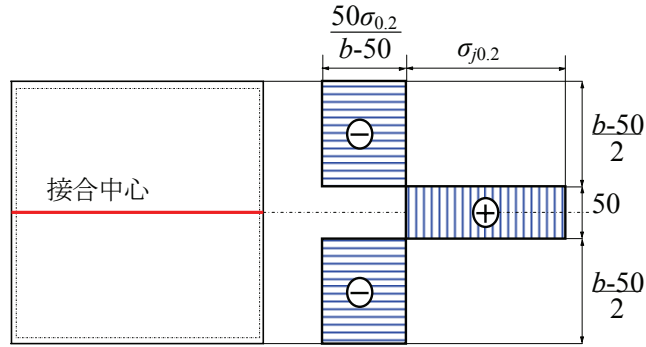
図-5(c)の増厚中央接合板の場合、中央50mmの範囲が式(1)で与えられる板厚に増厚され、この範囲に $\sigma_{j0.2}$ の引張残留応力が発生するので、これに釣り合う圧縮残留応力は $50\sigma_{j0.2}/(b-50)$ になる。



(a) 端部接合板



(b) 等厚中央接合板



(c) 増厚中央接合板

図-5 両縁支持板の残留応力分布

(3) 圧縮を受ける両縁支持板の耐荷力表示で使用されるパラメータ

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は次式で定義される。

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

圧縮を受ける両縁支持板の耐荷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 : $\sigma_{p0.2} = \frac{b-50}{b} \sigma_{0.2} + \frac{50}{b} \sigma_{j0.2}$ (b の単位：mm)				

$\sigma_{p0.2}$ 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 ：両縁支持板の圧縮強度の上限値 $\sigma_{p0.2}$ 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)

式(8)のルートの中の数値4は、圧縮を受ける両縁支持板の座屈係数の値である。

(4) 耐荷力の特徴

圧縮を受ける両縁支持板の耐荷力は、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除した値で、 σ_u で表す。圧縮を受ける両縁支持板の耐荷力の特徴は次のとおりである。

- ① A6061-T6の端部接合板の、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ 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る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、後述の表-3に示すように、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²⁾の規定値は見直しが必要である。

(5) 耐荷力曲線

FEM解析による弾塑性有限変位解析の結果を曲線近似することにより、圧縮を受ける両縁支持板の耐荷力曲線が次式で与えられる。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{p0.2}} = \begin{cases} 1 & (R_p \leq R_{cr}) \\ 1 - 0.4 \frac{R_p - R_{cr}}{R_{0.6} - R_{cr}} & (R_{cr} \leq R_p \leq R_{0.6}) \\ 0.6 \left(\frac{R_{0.6}}{R_p} \right)^m & (R_{0.6} \leq R_p) \end{cases} \quad (9)$$

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

耐荷力曲線の分類および R_{cr} 、 $R_{0.6}$ 、 m の値を表-3に示し、耐荷力曲線を図-6に示す。

表-3 圧縮を受ける両縁支持板の耐荷力曲線の分類および R_{cr} , $R_{0.6}$, m の値

アルミニウム合金	非接合板 等厚中央接合板 増厚中央接合*	端部接合板		
		$200 \leq b < 300$	$300 \leq b < 500$	$500 \leq b$
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

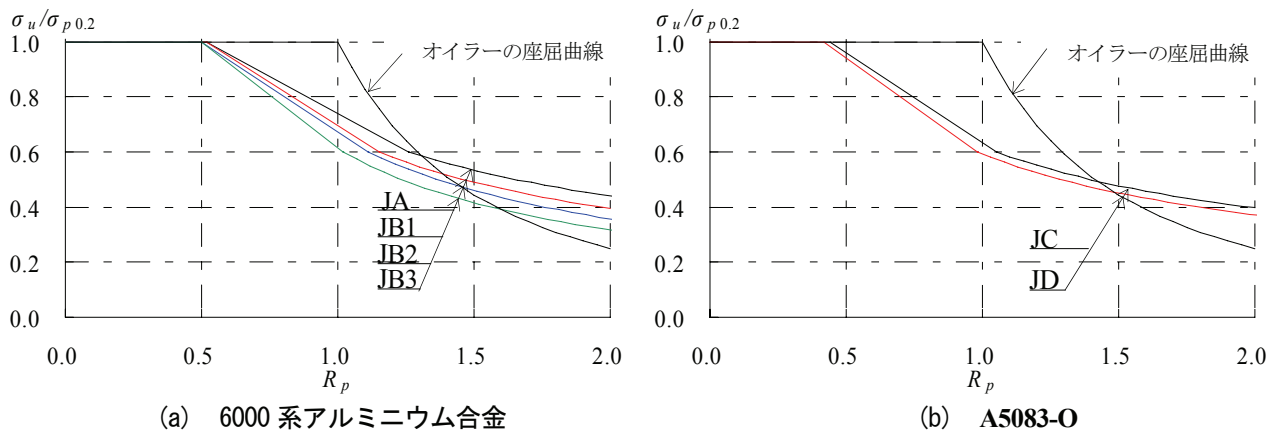


図-6 圧縮を受ける両縁支持板の耐荷力曲線

3. 圧縮を受ける片縁支持板¹⁾

(1) 接合位置と片縁支持板

片縁支持されたアルミニウム合金板の圧縮耐荷力が適用される板要素として、図-7に示す圧縮荷重または曲げ荷重を受けるI型断面部材のフランジが挙げられる。図-7(a)は、T型断面の押出形材がそのまま用いられる場合である。この場合、フランジとウェブは接合する必要はないが、フランジ幅は押出ダイスの寸法制限を受け、現在、我国で製造できるT型断面の押出形材の板幅は約250mmである¹³⁾。したがって、この断面のフランジの最大幅は約250mmである。

図-7(b)は、MIG溶接を用いて、フランジとウェブを隅肉溶接で連結することによりI型断面部材を製作する場合である。フランジとウェブには圧延板が用いられ、250mmを超えるフランジ幅も可能である。6000系の熱処理アルミニウム合金の場合、図-7(b)に示すように、隅肉溶接のルートから最大で各側25mmの範囲の強度が低下する⁴⁾⁶⁾。

本章では、図-8に示す2種類の片縁支持板に対して、その圧縮耐荷力を明らかにする。図-8(a)と(b)は、それぞれ図-7(a)と(b)の片側のフランジに対応する。

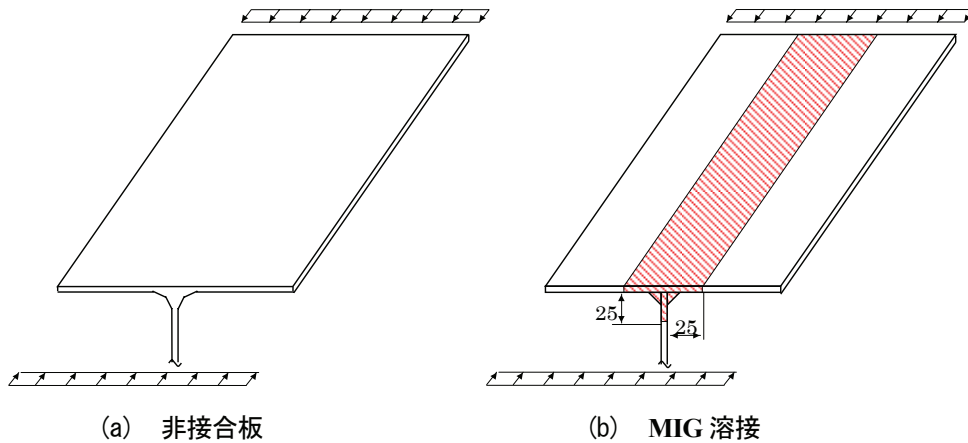


図-7 I型断面部材のフランジ

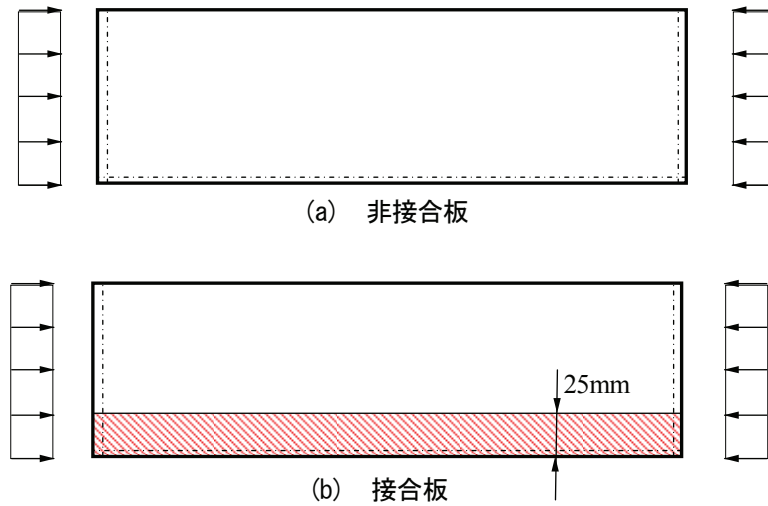


図-8 圧縮を受ける片縁支持板

(2) FEMによる弾塑性有限変位解析

a) 解析対象

解析対象は、図-9に示す、面外方向に3辺単純支持、1辺自由の長方形板である。このような境界条件の長方形板の圧縮耐荷力は、縦横比 a/b が大きくなるに従って低下し、 a/b が4以上になると一定値になる。したがって $a/b=4$ の長方形板を解析対象とする。 $x=0$ と a の辺に圧縮荷重を強制変位で与え、非載荷辺 $y=0$ の y 軸方向の変位を拘束する。アルミニウム合金の応力-ひずみ関係として、2. (2) a) で述べたものを使用する。

b) 初期たわみと残留応力

図-9を参照して、次式で与えられる、 x 軸方向にサイン半波形、 y 軸方向に直線分布の初期たわみを圧縮を受ける片縁支持板に仮定する。

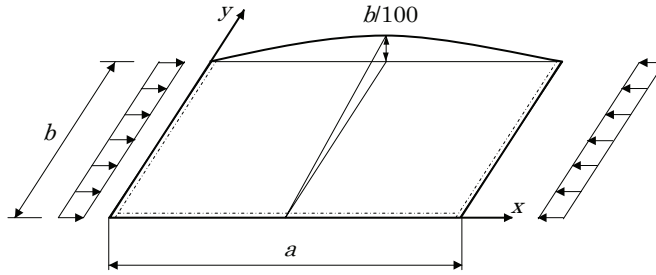


図-9 圧縮を受ける片縁支持板の境界条件

$$w_0 = \frac{y}{100} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (10)$$

最大初期たわみは自由辺 $y=b$ で $b/100$ である。

フランジとウェブがMIG溶接による隅肉溶接によって連結された、アルミニウム合金A5083-OのI型断面桁のフランジに生じる残留応力は、図-10に示す矩形分布で表されることが示されている¹⁵⁾。接合中心から25mmの範囲に、接合部の0.2%耐力 $\sigma_{j0.2}$ （表-1に示すように、A5083-Oの場合、接合部の0.2%耐力 $\sigma_{j0.2}$ は母材の0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ に等しい）に等しい引張残留応力、それから離れた位置に、 $25 \sigma_{j0.2} / (b-25)$ の大きさ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-10に示す残留応力分布を6000系アルミニウム合金にも適用する。

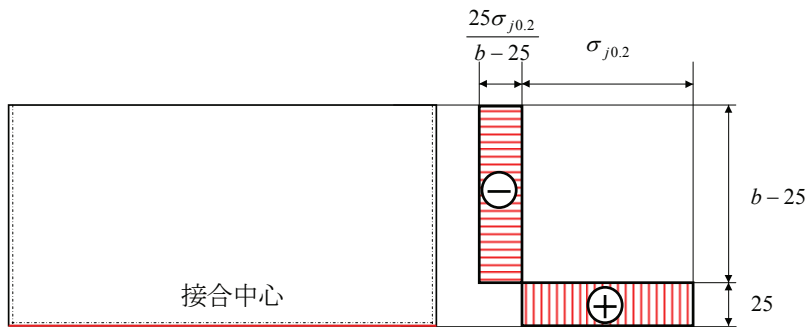


図-10 片縁支持板の残留応力分布

(3) 圧縮を受ける片縁支持板の耐荷力表示で使用されるパラメータ

圧縮を受ける片縁支持板の耐荷力を無次元表示する際、板の種類に応じて、表-4に示す、片縁支持板の圧縮強度の上限値 $\sigma_{p0.2}$ を使用する。

表-4 片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	接合板
A6061-T6 A6005C-T5	A	B
A5083-O	A	A
A : $\sigma_{p0.2} = \sigma_{0.2}$		
B : $\sigma_{p0.2} = \frac{b-25}{b} \sigma_{0.2} + \frac{25}{b} \sigma_{j0.2}$ (bの単位: mm)		

$\sigma_{p0.2}$ を用いることにより、圧縮を受ける片縁支持板の幅厚比パラメータ R_p は次式で定義される。

$$R_p = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{0.425} \frac{\sigma_{p0.2}}{E} \beta} \quad (11)$$

式(11)のルートの中の数値0.425は圧縮を受ける片縁支持板の座屈係数の値である。

(4) 耐力の特徴

圧縮を受ける片縁支持板の耐力は、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除した値で、 σ_u で表す。圧縮を受ける片縁支持板の耐力の特徴は次のとおりである。

- ① アルミニウム合金A6061-T6の接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ で表された耐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。
- ② アルミニウム合金A6061-T6の接合板において、板幅が75mm以下の長方形板においては、 $0.6 \leq R_p < 1.2$ の範囲で残留応力が耐力を低下させるが、 $R_p > 1.2$ では、残留応力の影響はない。
- ③ 非接合板においては、A6005C-T5板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_p$ 関係がA6061-T6板の関係にはほぼ一致する。残留応力を有する、板幅が50mmの接合板においては、 $0.6 \leq R_p < 0.9$ の範囲でA6005C-T5板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ がA6061-T6板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ より低く、 $R_p \geq 1.0$ の範囲でA6061-T6の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ がA6005C-T5板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ より低くなる。
- ④ A5083-Oの接合板の耐力は残留応力の影響により、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。
- ⑤ 幅厚比パラメータ R_{cr} （耐力曲線が $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=1.0$ に交差する幅厚比パラメータの値）の値は、後述の表-5に示すように、A6061-T6とA6005C-T5の場合0.46から0.49であり、A5083-Oの場合0.40である。幅厚比パラメータの値が0.7に固定されているJAA指針²⁾の規定値は見直しが必要である。

(5) 耐力曲線

FEM解析による弾塑性有限変位解析の結果を曲線近似することにより、圧縮を受ける片縁支持板の耐力曲線が次式で与えられる。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{p0.2}} = \begin{cases} 1 & (R_p \leq R_{cr}) \\ 1 - 0.35 \left(\frac{R_p - R_{cr}}{R_{0.65} - R_{cr}} \right)^2 & (R_{cr} \leq R_p \leq R_{0.65}) \\ 0.65 \left(\frac{R_{0.65}}{R_p} \right)^m & (R_{0.65} \leq R_p) \end{cases} \quad (12)$$

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

$R_{0.65}$: $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=0.65$ に対する R_p の値

m : 定数

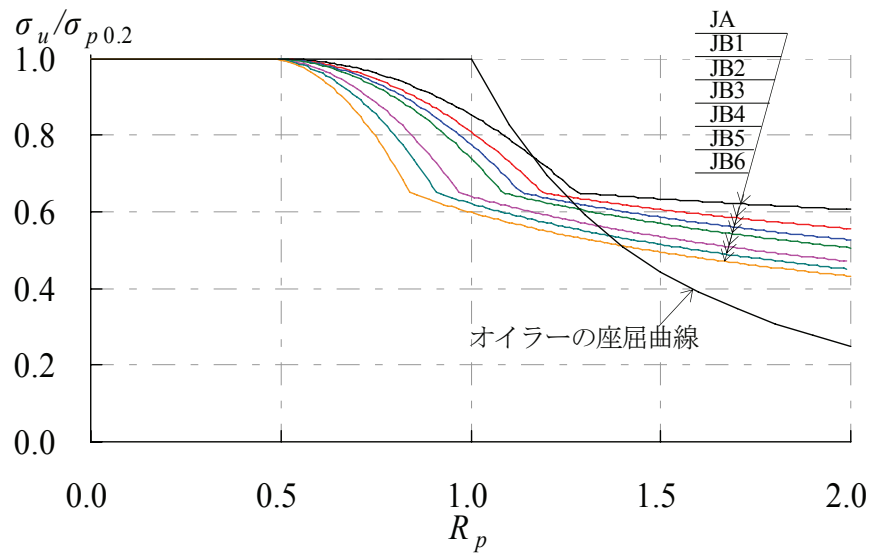
耐力曲線の区分と R_{cr} 、 $R_{0.65}$ 、 m の値を表-5に示し、耐力曲線を図-11に示す。

表-5 圧縮を受ける片縁支持板の耐荷力曲線の区分と R_{cr} , $R_{0.65}$, m の値

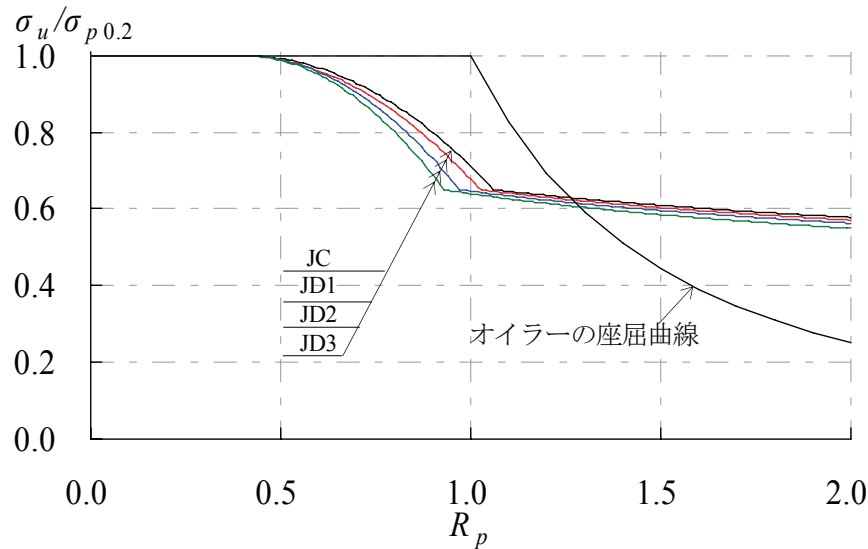
アルミニウム合金		A6061-T6 A6005C-T6	A5083-O
非接合板		JA	JC
接合板	$200 \leq b$	JB1	JD1
	$125 \leq b < 200$	JB2	
	$100 \leq b < 125$	JB3	
	$75 \leq b < 100$	JB4	JD2
	$60 \leq b < 75$	JB5	JD3
	$50 \leq b < 60$	JB6	

	R_{cr}	$R_{0.65}$	m
JA	0.49	1.28	0.16
JB1	0.48	1.18	0.29
JB2	0.47	1.13	0.37
JB3	0.47	1.08	0.41
JB4	0.47	0.98	0.45
JB5	0.47	0.92	0.47
JB6	0.46	0.84	0.47
JC	0.40	1.06	0.19
JD1	0.40	1.02	0.20
JD2	0.40	0.97	0.20
JD3	0.40	0.93	0.22

* : b の単位 mm



(a) 6000系アルミニウム合金



(b) A5083-O

図-11 圧縮を受ける片縁支持板の耐荷力曲線

4. 面内曲げを受ける両縁支持板¹²⁾

(1) 接合方法と接合位置

アルミニウム合金桁の製作方法を図-12に示す。図-12(a)は、I型断面の押出型材を桁として使用する場合である。押出型材の高さは、押出ダイスの寸法制限を受け、現在、我国で製造できるI型断面の押出型材の最大高さは約250mmである¹³⁾。この桁は接合をもたない。

250mmより高い桁を製作する場合、図-12(b), (c), (d)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-12(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圧延板が用いられる。

図-12(c)は、摩擦攪拌接合を使用する場合であり、T型断面の押出型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型断面の押出型材の高さは、前述したように、押出ダイスの寸法制限を受け、その最大高さは約250mmである。したがって、この製作方法で製作される桁の最大高さは約500mmである。

図-12(d)は、T型断面の押出型材と摩擦攪拌接合を用いて、図-12(c)の中央接合では製作できない桁高の桁を製作する場合、または押出ダイスの寸法制限のためにT型断面の押出型材の高さを250mmより低くしなければならぬ場合に対するものである。二つのT型断面の押出型材の間に平板の押出型材または圧延板を置き、摩擦攪拌接合による突合せ接合によって桁が製作される。任意の幅の板（押出型材の場合、板幅は500mm以下）を用いることによって、任意の高さの桁を製作することができる。接合位置 c は、T型断面の押出型材の高さの制限を受け、最大250mmである。

図-12(c)と(d)は、摩擦攪拌接合の代わりにMIG溶接による突合せ溶接でも製作することができる。

6000系の熱処理アルミニウム合金の場合、接合部の強度が低下する。図-12(b), (c), (d)の斜線が施された部分が強度低下を起こす範囲であり、接合中心から最大で各側25mmの範囲の強度が低下する⁴⁾⁶⁾。図-12(b)では、板の両縁に接合位置が存在し、接合部の強度が低下する範囲は板の各縁から25mmである。図-12(c)では、板の中央に接合位置が存在し、接合部の強度が低下する範囲は、接合中心から各側25mmで、合計50mmである。図-12(d)では、接合位置 c は最小25mmから最大250mmまでである。接合位置 c の各側

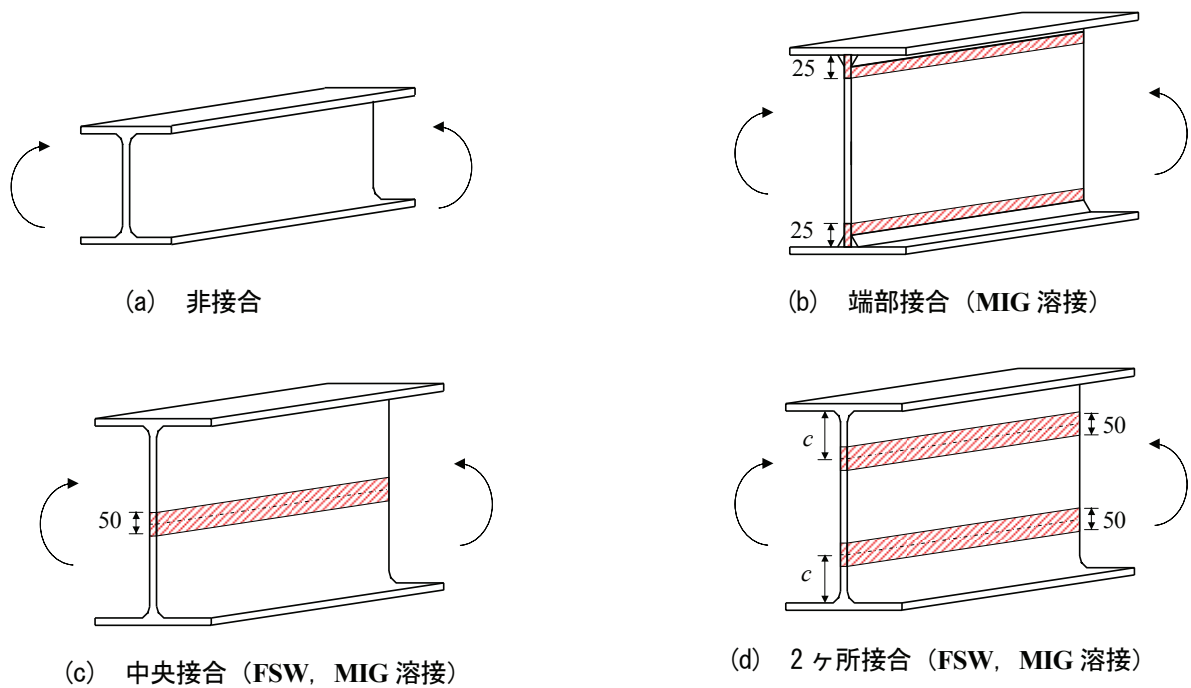


図-12 アルミニウム合金桁の製作方法

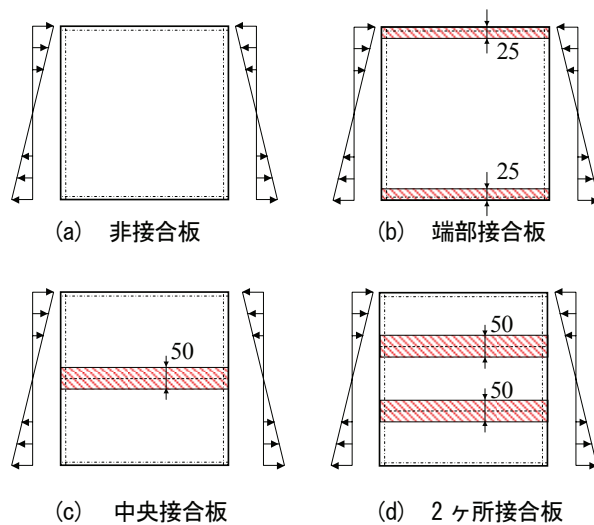


図-13 面内曲げを受ける両縁支持板

25mmで、合計50mmの範囲の強度が低下する。

本章では、図-13に示す、面内曲げを受ける4種類の両縁支持板の耐荷力を明らかにする。図-13(a), (b), (c), (d)は、それぞれ図-12(a), (b), (c), (d)のウェブに対応する。

(2) FEMによる弾塑性有限変位解析

a) 解析対象

図-14に示すように、対称性より長方形板の左側半分を解析対象とする。原点の y 軸方向の変位を拘束する以外、非載荷辺の面内方向の変位は自由である。 $(0, b/2)$ の節点を中心として、 $x=0$ の辺を z 軸回りに強制回転させることにより長方形板に面内曲げを与える。ただし、 $(0, b/2)$ の節点の x 軸方向の変位は拘束

しない。これを実現させるために、 $x=0$ の辺に剛棒を取り付け、長方形板の板要素の節点と剛棒の節点を共有させる。有限要素として、板に対して 8 節点厚肉シェル要素 (MARC¹⁴) における要素番号 22)、剛棒に対して 3 次元弾性梁要素 (MARC における要素番号 52) を使用する。3 次元弾性梁要素の伸び剛性とねじり剛性をゼロ、曲げ剛性に大きな値を設定することにより、剛棒を実現する。さらに、 $(0, b/2)$ の節点と $x=0$ の辺上の各節点をタイイングし、 $(0, b/2)$ の節点の z 軸回りの回転角と $x=0$ の辺上の各節点の z 軸回りの回転角が同じになるようにする。

縦横比 a/b が 0.5 の近傍で耐荷力が最小となるので、この縦横比に対して FEM 解析を行う。ただし、2ヶ所接合板の一部で、 $a/b=0.5$ では適切な解が得られない場合があり、この場合に対して、 $a/b=0.4$ または 0.3 で再計算を行う。アルミニウム合金の応力-ひずみ関係として、2. (2) a) で述べたものを使用する。

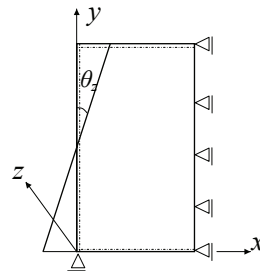


図-14 面内曲げを受ける両縁支持板の境界条件

b) 初期たわみと残留応力

面内曲げを受ける両縁支持板に対して、次式で与えられるサイン半波形の初期たわみを仮定する。

$$w_0 = \frac{b}{250} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (13)$$

2. (2) c) で述べたように、摩擦攪拌接合部および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⁴⁾。これを考慮して、接合板の残留応力分布に対する仮定を図-15に示す。

図-15 (a) の端部接合板の場合、各縁から25mmの範囲が、 $\sigma_{0.2}$ の引張残留応力であり、それから離れた位置では、 $50 \sigma_{0.2} / (b-50)$ の圧縮残留応力である。ここで、 $\sigma_{0.2}$ は接合部の0.2%耐力であり、 b は板幅 (単位: mm) である。

図-15 (b) の中央接合板の場合、中央50mmの範囲が、 $\sigma_{0.2}$ の引張残留応力であり、それから離れた位置では $50 \sigma_{0.2} / (b-50)$ の圧縮残留応力である。

図-15 (c) の2ヶ所接合板の場合、各ヶ所の接合中心の各側25mmの範囲が、 $\sigma_{0.2}$ の引張残留応力であり、この引張残留応力とつり合う圧縮残留応力の大きさは $100 \sigma_{0.2} / (b-100)$ である。

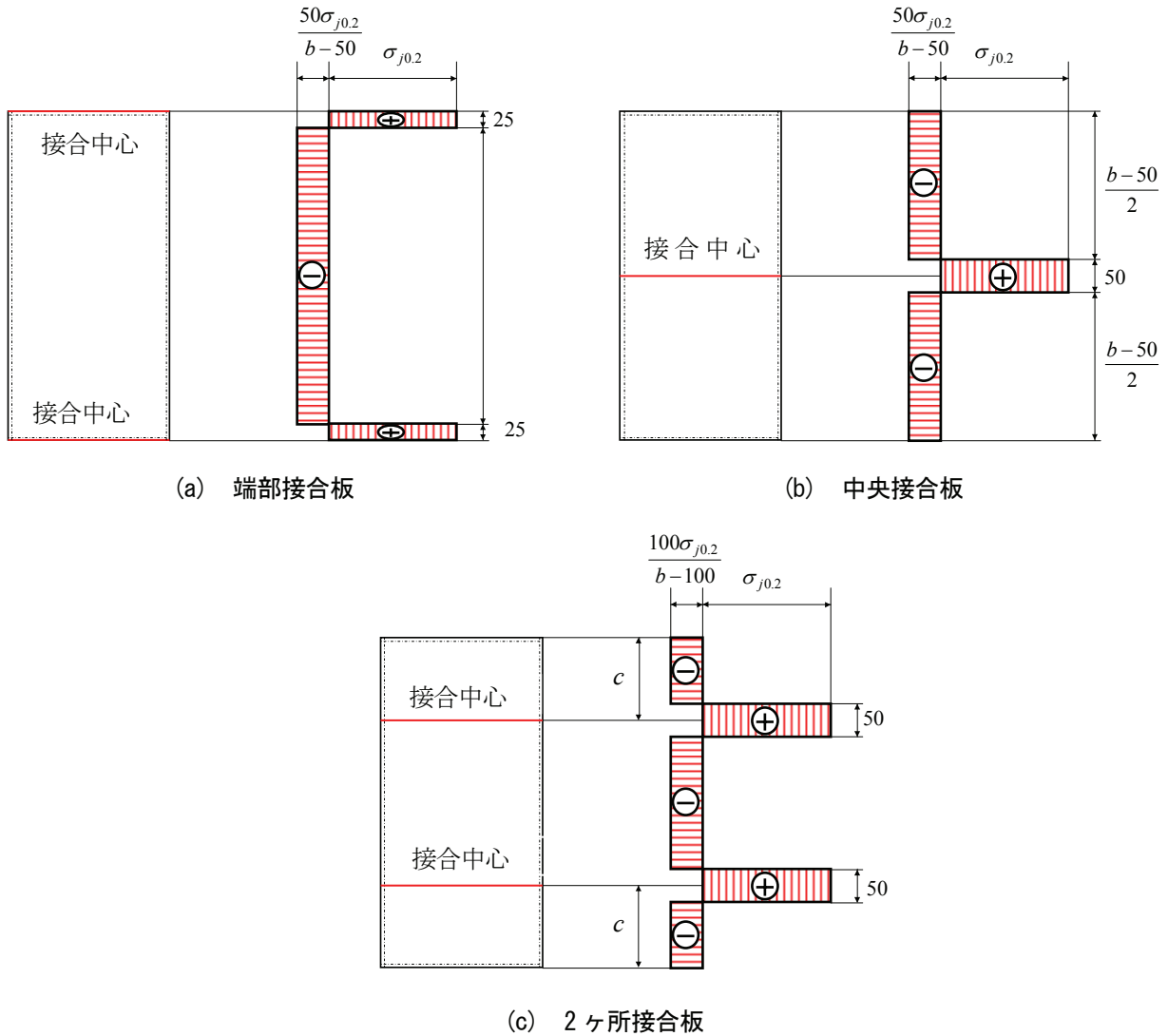


図-15 両縁支持板の残留応力分布

(3) 面内曲げを受ける両縁支持板の耐荷力表示で使用されるパラメータ

面内曲げを受ける両縁支持板の耐荷力 σ_u を次式で定義する。

$$\sigma_u = \frac{M_u}{W} \quad (14)$$

ここに、 M_u : 最大曲げモーメント
 $W=b^2t/6$: 長方形板の弾性断面係数

M_u は、FEM解析において、 $(0, b/2)$ の節点に与えられる強制回転角に対する反力モーメントであり、荷重が増加しなくなったときの値である。

接合部の強度が低下する、アルミニウム合金A6061-T6とA6005C-T5の長方形板の全塑性モーメント M_p は次のように与えられる。

$$M_p = Z\sigma_{p0.2} \quad (15)$$

ここに、 $Z=b^2t/4$: 長方形板の塑性断面係数

非接合板 : $\sigma_{p0.2} = \sigma_{0.2}$

$$\begin{aligned}
\text{端部接合板} & : \sigma_{p0.2} = \left(1 - \frac{100}{b} + \frac{2500}{b^2}\right)\sigma_{0.2} + \left(\frac{100}{b} - \frac{2500}{b^2}\right)\sigma_{j0.2} \\
\text{中央接合板} & : \sigma_{p0.2} = \left(1 - \frac{2500}{b^2}\right)\sigma_{0.2} + \frac{2500}{b^2}\sigma_{j0.2} \\
\text{2ヶ所接合板} & : \sigma_{p0.2} = \left(1 - \frac{200}{b} + \frac{400c}{b^2}\right)\sigma_{0.2} + \left(\frac{200}{b} - \frac{400c}{b^2}\right)\sigma_{j0.2} \\
c & : \text{長方形板の各縁から接合中心までの距離 (単位: mm)} \\
b \text{ と } t \text{ の単位} & : \text{mm}
\end{aligned}$$

アルミニウム合金A5083-Oの接合部は強度低下を起こさないため、A5083-Oの長方形板の全塑性モーメント M_p は、式(15)の $\sigma_{p0.2}$ を $\sigma_{0.2}$ として与えられる。

長方形板の板厚が厚くなると、最大曲げモーメント M_u は全塑性モーメント M_p に達する。したがって式(14)の M_u に式(15)の M_p を代入して、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=1.5$ を得る。これは、耐荷力 σ_u を $\sigma_{p0.2}$ で無次元化した $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ を用いれば、長方形板の板厚が厚くなると、非接合板、端部接合板、中央接合板および2ヶ所接合板に関らず、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は1.5に収束することを示している。

$\sigma_{p0.2}$ を用いることにより、面内曲げを受ける両縁支持板の幅厚比パラメータ R_p は次式で定義される。

$$R_p = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{23.9} \frac{\sigma_{p0.2}}{E} \beta} \quad (16)$$

式(16)のルートの中の数値23.9は面内曲げを受ける両縁支持板の座屈係数の値である。

(4) 耐荷力の特徴

面内曲げを受ける両縁支持板の耐荷力の特徴は次のとおりである。

- ① A6061-T6の端部接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ 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。中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は非接合板のそれにほぼ等しい。
- ② 2ヶ所接合板においては、接合位置が長方形板の縁に近いとき、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ 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。接合位置が長方形板の縁から遠ざかると、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は非接合板のそれに近づく。
- ③ A6061-T6の端部接合板、中央接合板および2ヶ所接合板では、残留応力の影響はほとんどない。
- ④ A6061-T6の中央接合板および2ヶ所接合板において、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。
- ⑤ A6005C-T5板の非接合板、端部接合板および中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ はA6061-T6板のそれにほぼ等しい。 $c=25\text{mm}$ の2ヶ所接合板では、A6005C-T5板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が³⁾、A6061-T6板のそれより幾分高い。
- ⑥ A5083-Oの端部接合板では残留応力の影響はない。中央接合板では残留応力の影響より、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が幾分低下する。2ヶ所接合板では接合位置が長方形板の縁から遠ざかると $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が低下する。
- ⑦ 幅厚比パラメータ $R_{0.1}$ （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、後述の表-6に示すように、A6061-T6とA6005C-T5に対して0.68から0.94、A5083-Oに対して0.71から0.82である。したがって、 $R_{0.1}$ が1.0に固定されているJAA指針²⁾の規定値は見直す必要がある。

(5) 耐力力曲線

FEM 解析による弾塑性有限変位解析の結果を曲線近似することにより、面内曲げを受ける両縁支持板の耐力力曲線が次式で与えられる。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{p0.2}} = \begin{cases} 1.5 & (R_p \leq R_{cr}) \\ 1.5 - 0.7 \frac{R_p - R_{cr}}{R_{0.8} - R_{cr}} & (R_{cr} \leq R_p \leq R_{0.8}) \\ 0.8 \left(\frac{R_{0.8}}{R_p} \right)^m & (R_{0.8} \leq R_p) \end{cases} \quad (17)$$

ここに、 R_{cr} : 耐力力曲線が $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=1.5$ に交差する幅厚比パラメータの値

$R_{0.8}$: $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=0.8$ に対する R_p の値

m : 定数

耐力力曲線の区分と R_{cr} , $R_{0.8}$, $R_{1.0}$, m の値を表-6 に示し、耐力力曲線を図-16 に示す。ここで、 $R_{1.0}$ は、耐力力曲線が $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=1.0$ に交差する幅厚比パラメータの値である。

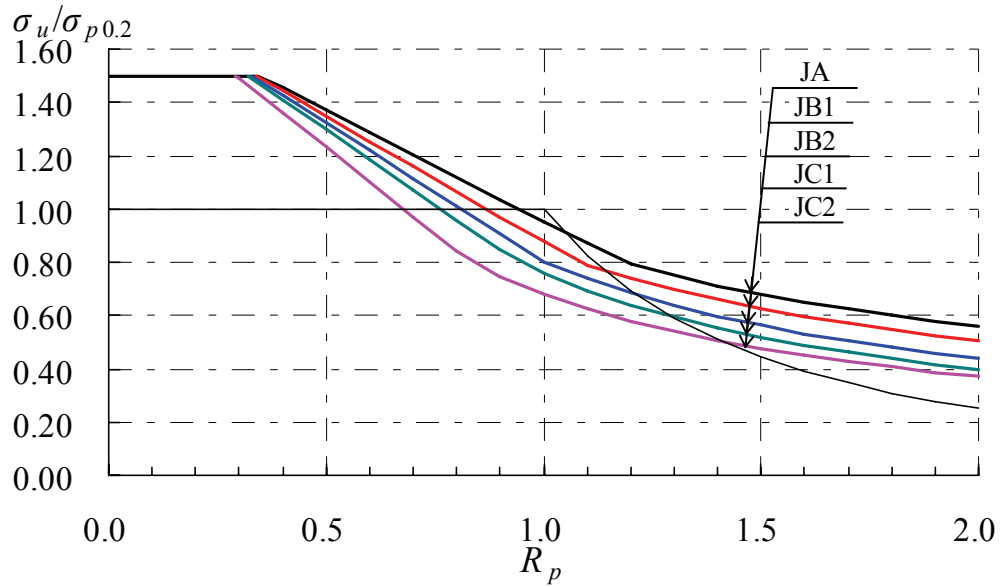
表-6 面内曲げを受ける両縁支持板の耐力力曲線の区分と R_{cr} , $R_{0.8}$, $R_{1.0}$, m の値

アルミニウム合金		A6061-T6 A6005C-T5	A5083-O	
非接合板		JA		
端部接合板	$1200 \leq b$	JB1	JD	
	$600 \leq b < 1200$	JB2		
	$400 \leq b < 600$	JC1		
中央接合板	$400 \leq b$	JA	JE	
2ヶ所接合板	$800 \leq b$	$c \geq b/6$	JA	JF
		$25 \leq c < b/6$	JC1	
	$600 \leq b < 800$	$c \geq b/6$	JA	
		$25 \leq c < b/6$	JC2	
	$400 \leq b < 600$	$c \geq b/5$	JA	
		$25 \leq c < b/5$	JC2	

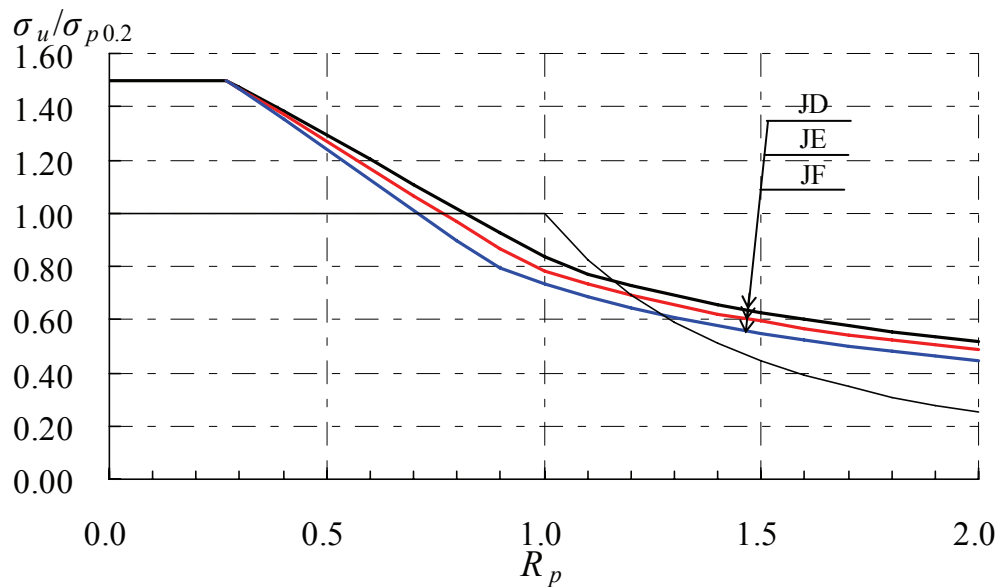
	R_{cr}	$R_{0.8}$	m	$R_{1.0}$
JA	0.34	1.18	0.69	0.94
JB1	0.34	1.08	0.75	0.87
JB2	0.32	1.00	0.87	0.81
JC1	0.32	0.94	0.92	0.76
JC2	0.29	0.83	0.88	0.68
JD	0.27	1.04	0.67	0.82
JE	0.27	0.96	0.68	0.77
JF	0.27	0.89	0.72	0.71

b : 板幅 (単位 : mm)

c : 接合位置 (単位 : mm)



(a) 6000系アルミニウム合金



(b) A5083-O

図-16 面内曲げを受ける両縁支持板の耐荷力曲線

5. 結論

本論文では、圧縮を受ける両縁支持板と片縁支持板の耐荷力、および面内曲げを受ける両縁支持板の耐荷力について述べた。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。摩擦攪拌接合およびMIG溶接によって生じる接合部の強度低下と残留応力を考慮し、FEMによる弾塑性有限変位解析によって耐荷力を算出した。接合位置と板幅が耐荷力に大きく影響することを明らかにするとともに、耐荷力曲線を与えた。

鋼板の耐荷力には溶接残留応力が大きく影響するが、アルミニウム合金板の耐荷力に摩擦撹拌接合およびMIG溶接による接合残留応力はあまり影響しない。6000系アルミニウム合金板の場合、接合部に生じる引張残留応力の大きさが母材の0.2%耐力の半分程度であり、圧縮残留応力も母材の0.2%耐力と比較するとかなり小さいことが、接合残留応力が6000系アルミニウム合金板の耐荷力にあまり影響しない原因と考えられる。他方、A5083-O板の場合、図-4(c)に示すように、応力-ひずみ関係が0.2%耐力に近づくに従って大きく曲がり、接線係数が低下することによる影響が、接合残留応力による影響より大きいために、接合残留応力がA5083-O板の耐荷力にあまり影響しないと推察される。

鋼板の耐荷力に板幅の影響は現れないが、6000系の熱処理アルミニウム合金板においては板幅の影響が現れる。6000系の熱処理アルミニウム合金板の接合部の0.2%耐力は母材のその半分程度まで低下する。この強度低下が生じる範囲は、板幅に関係なく、接合中心から各側25mmまでであり、その範囲は殆ど変わらない。したがって、6000系の熱処理アルミニウム合金板においては、板幅が小さくなるに従って、接合部の強度低下の影響が大きくなる。

参考文献

- 1) 鋼構造委員会：21世紀の建設材料アルミニウム合金の可能性，土木学会，平成22年度全国大会，研究討論会，研-06資料，2010。
- 2) 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。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，2002。
- 4) 大倉一郎，長尾隆史，石川敏之，萩澤亘保，大隅心平：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。
- 5) 大倉一郎，長尾隆史，萩澤亘保：アルミニウム床版の移動トラックタイヤ載荷試験による疲労耐久性評価，構造工学論文集，Vol.56A，pp.1217-1226，2010。
- 6) 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。
- 7) 萩澤亘保，大倉一郎：アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦撹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。
- 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，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，構造工学論文集，Vol.56A，pp.111-121，2010。
- 11) 大倉一郎，小笠原康二：アルミニウム合金製自由突出板の圧縮耐荷力，ALST 研究レポート，No.12，2009。
- 12) 小笠原康二，大倉一郎：接合位置を考慮したアルミニウム合金板の曲げ耐荷力，ALST 研究レポート，No.15，2010。
- 13) 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
- 14) 日本マーク：MARC，K6，2005。
- 15) 大倉一郎，長尾隆史，石川敏之，萩澤亘保，大隅心平：構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係の定式化および MIG 溶接と摩擦撹拌接合によって発生する残留応力の定式化，ALST 研究レポート，No.1，2007。