

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 12

2009 年 12 月

大阪大学大学院工学研究科
大倉一郎，小笠原康二

概要

本研究では、圧縮を受ける自由突出板の耐荷力を 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。接合による残留応力および初期たわみを考慮し、さらに熱処理アルミニウム合金では接合部の強度低下を考慮した。本研究の成果に基づいて、圧縮を受ける自由突出板の耐荷力曲線を提案した。

目次

| | |
|---------------------------------|-------|
| 第1章 序論 | ・・・1 |
| 第2章 FEMによる弾塑性有限変位解析 | ・・・3 |
| 2.1 初期たわみ | ・・・3 |
| 2.2 残留応力 | ・・・3 |
| 2.3 要素分割 | ・・・4 |
| 2.4 縦横比の影響 | ・・・5 |
| 第3章 耐荷力表示で使用されるパラメータ | ・・・7 |
| 第4章 6000系アルミニウム合金板の耐荷力 | ・・・9 |
| 4.1 接合部の強度低下の影響 | ・・・9 |
| 4.2 残留応力の影響 | ・・・10 |
| 4.3 A6005C-T5板とA6061-T6板の耐荷力の比較 | ・・・13 |
| 第5章 A5083-O板の耐荷力 | ・・・15 |
| 第6章 耐荷力曲線 | ・・・16 |
| 6.1 耐荷力の定式化 | ・・・16 |
| 6.2 Eurocode 9の耐荷力曲線との比較 | ・・・19 |
| 第7章 結論 | ・・・22 |
| 参考文献 | ・・・24 |
| 付録A 図-4.1のFEM解析の数値データ | ・・・25 |
| 付録B 図-4.2のFEM解析の数値データ | ・・・26 |
| 付録C 図-4.3のFEM解析の数値データ | ・・・27 |
| 付録D 図-5.1のFEM解析の数値データ | ・・・28 |
| 付録E 耐荷力曲線とFEM解析値との比較 | ・・・29 |

第1章 序論

ALST 研究レポート 10¹⁾では両縁支持されたアルミニウム合金板の圧縮耐荷力を明らかにした。本研究レポートでは、片縁支持されたアルミニウム合金板の圧縮耐荷力を明らかにする。考慮するアルミニウム合金は、ALST 研究レポート 10 と同じ、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。

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-1.1 に示す圧縮または曲げを受ける I 型断面部材のフランジが挙げられる。図-1.1(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る。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²⁾。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-1.1(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-1.1(b)に示すように、隅肉溶接のルートから各側 25mm の範囲の強度が低下する³⁾。

本研究では、図-1.2 に示す 2 種類の自由突出板の圧縮耐荷力を明らかにする。図-1.2(a)と(b)は、それぞれ図-1.1(a)と(b)において、ウェブを中心として、左右の片側のフランジに対応する。

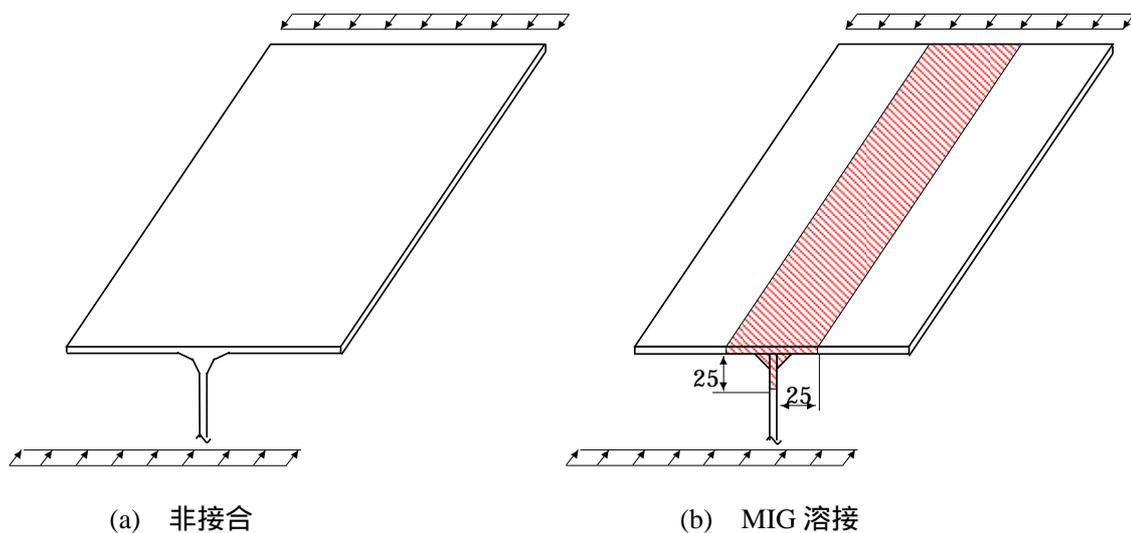
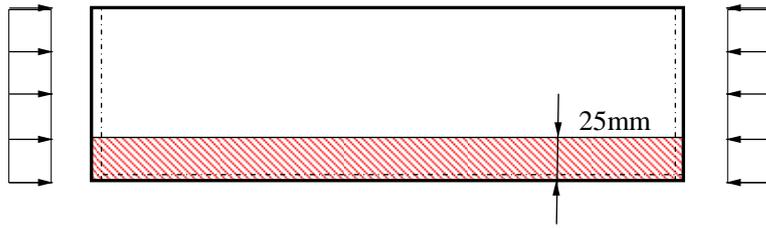


図-1.1 I型断面部材のフランジ



(a) 非接合板



(b) 接合板

图-1.2 自由突出板

第 2 章 FEM による弾塑性有限変位解析

2.1 初期たわみ

図-2.1 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自由突出板に仮定する。

$$w_0 = \frac{y}{100} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (2.1)$$

ここに、 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さ

式(2.1)から分るように、最大初期たわみは自由辺で $b/100$ である。これは、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）⁴⁾（以後、JAA 指針と呼ぶ）で規定されるフランジとウェブの直角度に対応している。

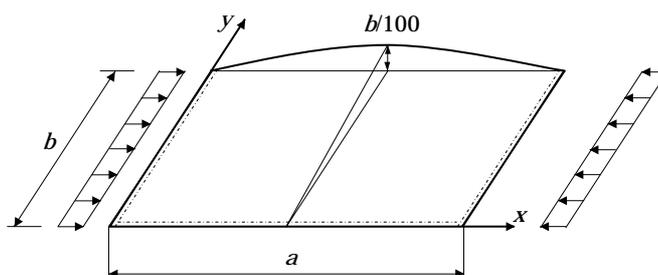


図-2.1 初期たわみ

2.2 残留応力

MIG 溶接による突合せ接合によって製作された板に対して、接合線方向の残留応力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⁵⁾。さらに、フランジとウェブが MIG 溶接による隅肉溶接によって製作された、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が、この矩形分布モデルで安全側に評価できることが示されている⁶⁾。したがって本研究では、図-2.2 に示すように、接合線から 25mm の範囲に、接合部の 0.2% 耐力 $\sigma_{j0.2}$ に等しい引張残留応力、それから離れた位置に、 $25\sigma_{j0.2}/(b-25)$ の圧縮残留応力を仮定する。ここで、 b は板幅であり、単位は mm である。

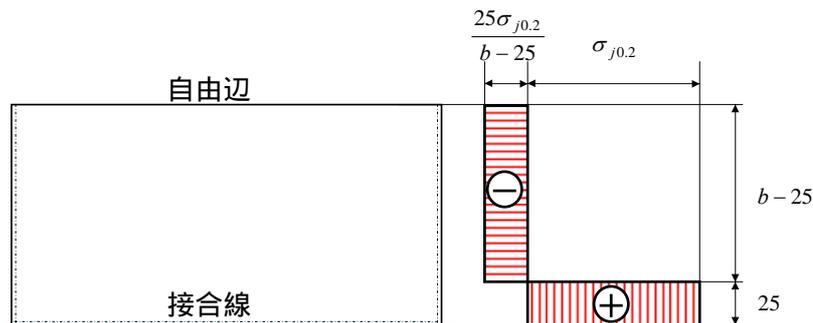


図-2.2 残留応力分布

2.3 要素分割

圧縮を受ける自由突出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 MARC⁷⁾を使用した。図-2.3 に示すように、解析対象は圧縮を受ける3辺単純支持、1辺自由の長方形板である。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長方形板の左側半分を要素分割する。境界条件を図-2.4 に示す。長方形板が平面内でy軸方向に座屈するのを防止するために、 $y=0$ の辺のy軸方向の面内変位 v を拘束している。 $x=0$ の辺を強制的に変位させることによって圧縮荷重を与える。アルミニウム合金の母材および接合部の応力-ひずみ関係に対して、ALST 研究レポート10¹⁾で与えられたものを使用する。

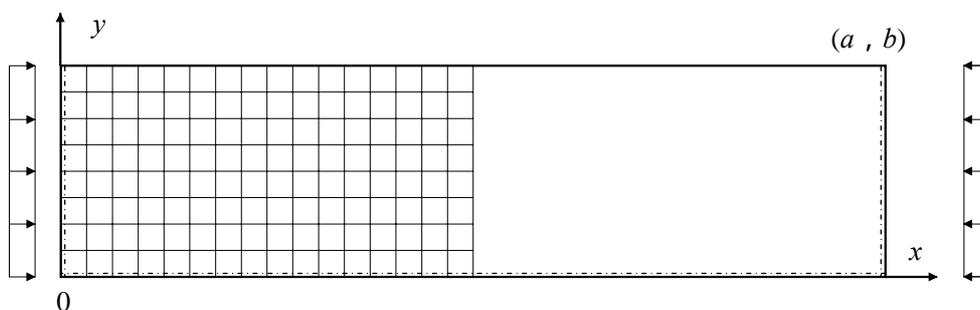


図-2.3 解析対象

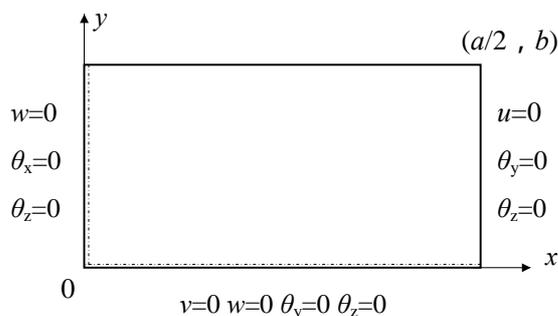


図-2.4 境界条件

耐荷力と板幅方向の要素分割数の関係を図-2.5 に示す。これは、アルミニウム合金が A6061-T6 で、 $a = 400 \text{ mm}$ 、 $b = 100 \text{ mm}$ の接合板の左側半分を正方形要素で、 16×8 、 24×12 、 32×16 に分割して得られる結果である。ここで、 16×8 において、16 は x 軸方向の要素分割数、8 は y 軸方向の要素分割数を表す。接合部の幅は 25 mm と一定であるため、接合部の板幅方向の要素分割は、 16×8 、 24×12 、 32×16 の要素分割に対して、それぞれ 2 要素、3 要素、4 要素になる。他方、図-2.5 の 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除して得られる値である。 $\sigma_{p0.2}$ は自由突出板の圧縮強度の上限値であり、 R_p は $\sigma_{p0.2}$ が用いられた幅厚比パラメータであり、両者とも第 3 章で詳述される。図-2.5 から分るように、 $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ は、 R_p が 0.5、1.0、1.5、2.0 の各値に対して、幅方向の要素分割数に係わらず同じである。したがって、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。

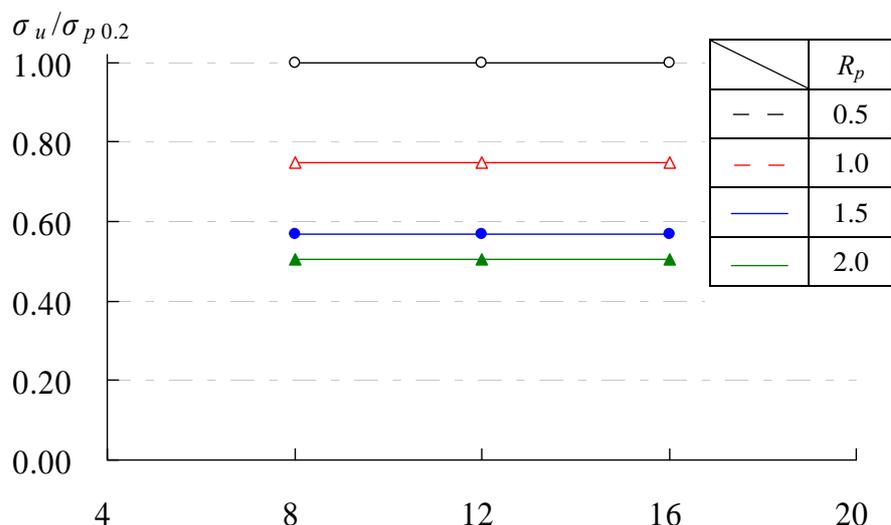


図-2.5 耐荷力と板幅方向の要素分割数の関係

2.4 縦横比の影響

自由突出板の座屈係数は次式で与えられる⁸⁾。

$$k = 0.425 + \frac{1}{\left(\frac{a}{b}\right)^2} \quad (2.1)$$

自由突出板の座屈係数は、長方形板の縦横比 a/b が大きくなるに従って低下し、0.425 に収束する。縦横比 a/b が自由突出板の耐荷力に与える影響を次に調べる。

$\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ と a/b の関係を図-2.6 に示す。アルミニウム合金は A6061-T6 で、板幅 100 mm の接合板に対する結果である。第 3 章で述べるように、幅厚比パラメータ R_p には 0.425 の座屈

係数が使用される。前節で述べた、要素分割数が解析精度に与える影響を考慮して、 a/b が 1, 2, 3, 4 の長方形板の要素分割数を 16×8 , a/b が 6 と 8 の長方形板の要素分割をそれぞれ 24×8 , 32×8 としている。 $R_p = 0.5$ の場合、 $a/b = 1$ で $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ の値が 1 をわずかに下回る。そして、 $R_p = 2.0$ の場合、 $a/b = 2$ で $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ の値が、 a/b が 1 および 3 に対する値よりわずかに低下する。しかし、 a/b が 4 以上になると、 R_p の各値において、 $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ の値はほぼ一定となる。したがって、次章以下の FEM 解析においては、縦横比 $a/b = 4$ の自由突出板を対象とし、その要素分割数を 16×8 とする。

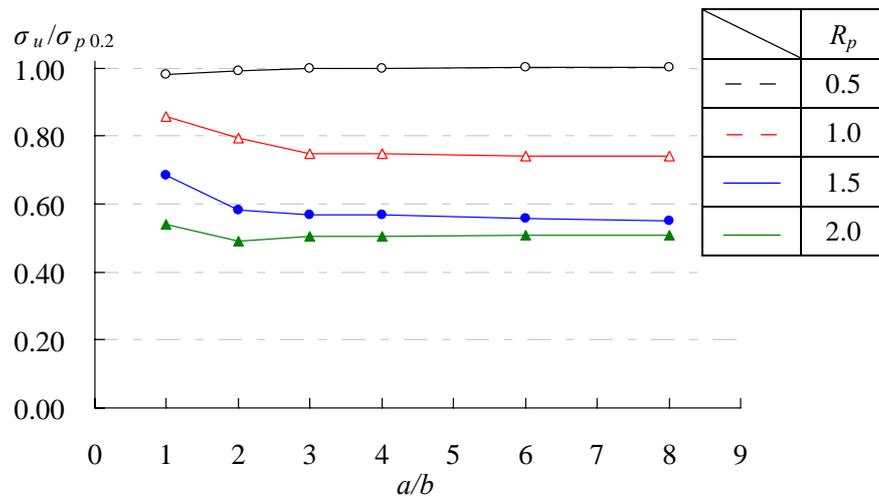


図-2.6 耐荷力と縦横比の関係

第3章 耐荷力表示で使用されるパラメータ

第2章で述べたように，アルミニウム合金 A6061-T6 と A6005C-T5 の接合部の 0.2%耐力は母材のそれより低い．このような自由突出板の圧縮強度の上限値は次式で与えられる．

$$\sigma_{p0.2} = \frac{A - A_j}{A} \sigma_{0.2} + \frac{A_j}{A} \sigma_{j0.2} \quad (3.1)$$

ここに， $\sigma_{p0.2}$: 自由突出板の圧縮強度の上限値

A : 自由突出板の全断面積

A_j : 自由突出板の接合部の断面積

図-1.2(b)の接合板に対して，アルミニウム合金 A6061-T6 と A6005C-T5 の圧縮強度の上限値は次式になる．

$$\sigma_{p0.2} = \frac{b - 25}{b} \sigma_{0.2} + \frac{25}{b} \sigma_{j0.2} \quad (3.2)$$

ここに， b の単位：mm

図-1.2(a)の非接合板に対して，A6061-T6 と A6005C-T5 のアルミニウム合金の圧縮強度の上限値は $\sigma_{0.2}$ である．A5083-O 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-1.2(a)の非接合板，図-1.2(b)の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．

$$\sigma_{p0.2} = \sigma_{0.2} \quad (3.3)$$

自由突出板の耐荷力を無次元表示する際，板の種類に応じて，表-3.1 に示す自由突出板の圧縮強度の上限値 $\sigma_{p0.2}$ を使用する．

表-3.1 自由突出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 : $\sigma_{p0.2} = \frac{b - 25}{b} \sigma_{0.2} + \frac{25}{b} \sigma_{j0.2}$

自由突出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．

$$R_p = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2) \sigma_{p0.2}}{k E}} \beta \quad (3.4)$$

ここに， R_p : 自由突出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)
 k : 自由突出板の座屈係数 (=0.425)
 E : ヤング係数 (=70GPa)
 β : 幅厚比 (=b/t)

第4章 6000系アルミニウム合金板の耐荷力

4.1 接合部の強度低下の影響

アルミニウム合金 A6061-T6 の非接合板と接合板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2} - R_p$ 関係を図-4.1 に示す。同図で、板幅 b に値が与えられている結果が接合板に対する耐荷力である。接合板において残留応力は考慮されていない。FEM 解析の数値データを付録 A に示す。

図-4.1 から分るように、接合板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ は非接合板より低下し、板幅が小さくなるほど低下する。これは、板幅が小さくなるに従って、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支持縁に接合部が位置しているためと考えられる。

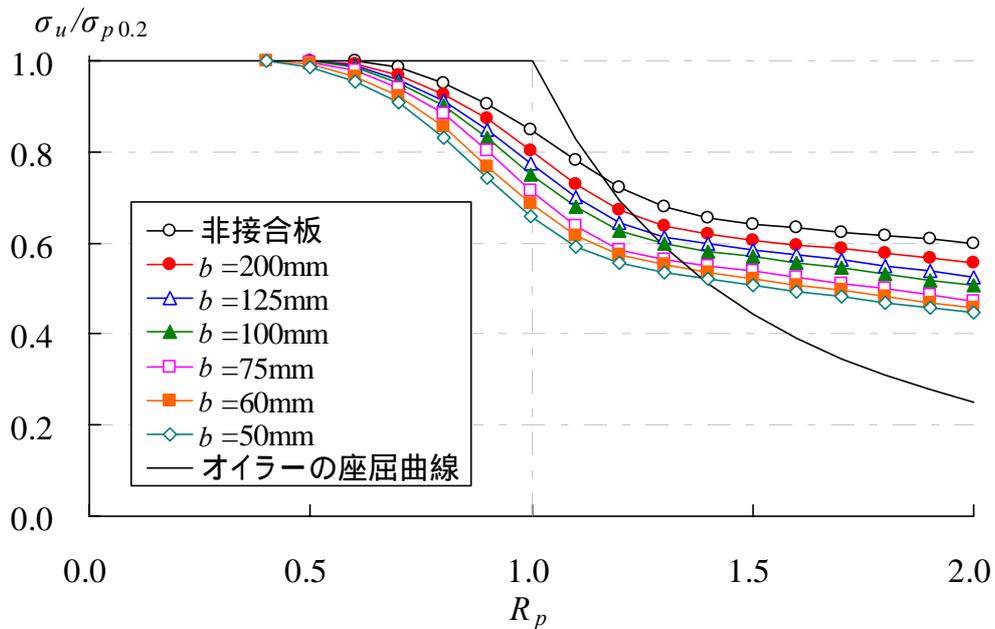
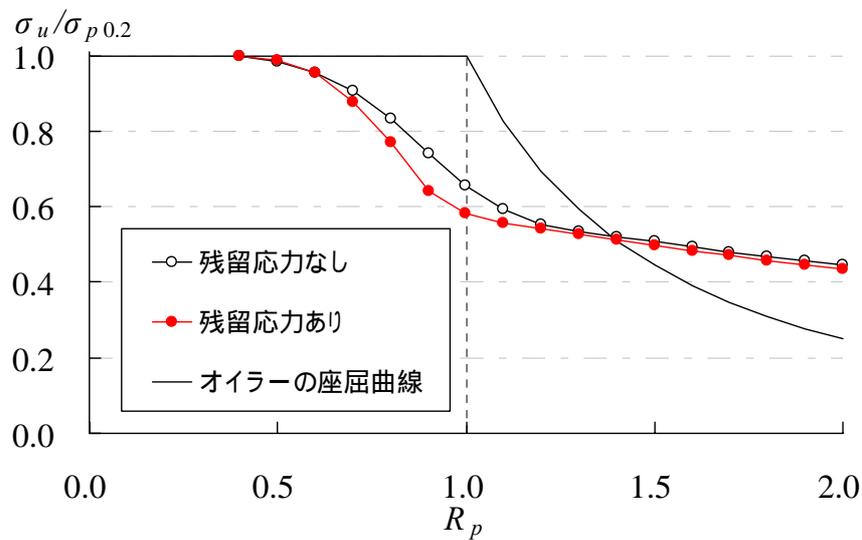


図-4.1 接合部の強度低下の影響

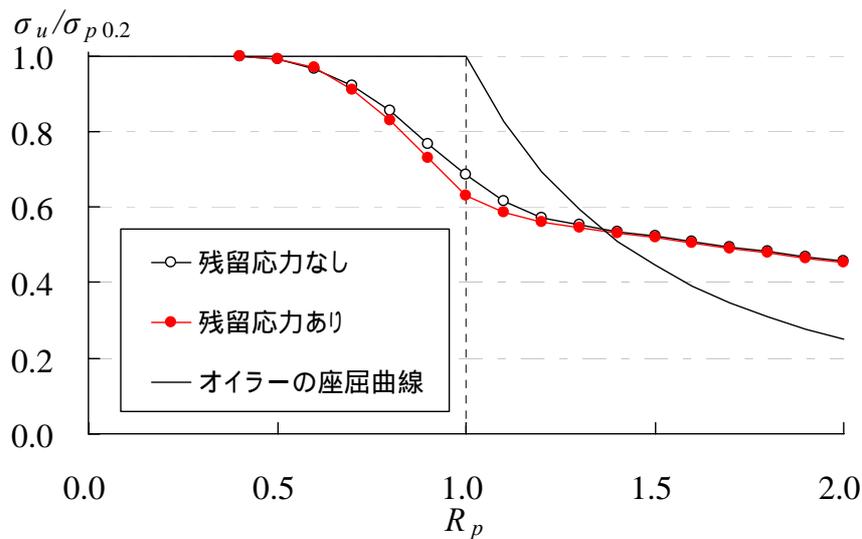
4.2 残留応力の影響

アルミニウム合金 A6061-T6 の接合板について、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-4.2 に示す。残留応力を考慮した接合板の FEM 解析の数値データを付録 B に示す。

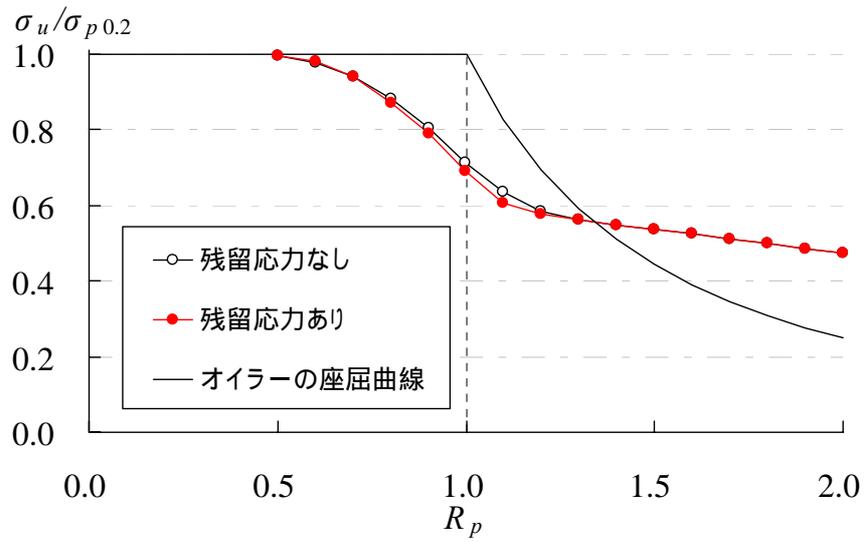
図-4.2 から分るように、板幅が 100mm 以上の長方形板では残留応力の影響はない。板幅が 75mm 以下の長方形板においては、 $0.6 < R_p < 1.2$ の範囲で残留応力が耐荷力を低下させるが、 $R_p > 1.2$ では、残留応力の影響はない。



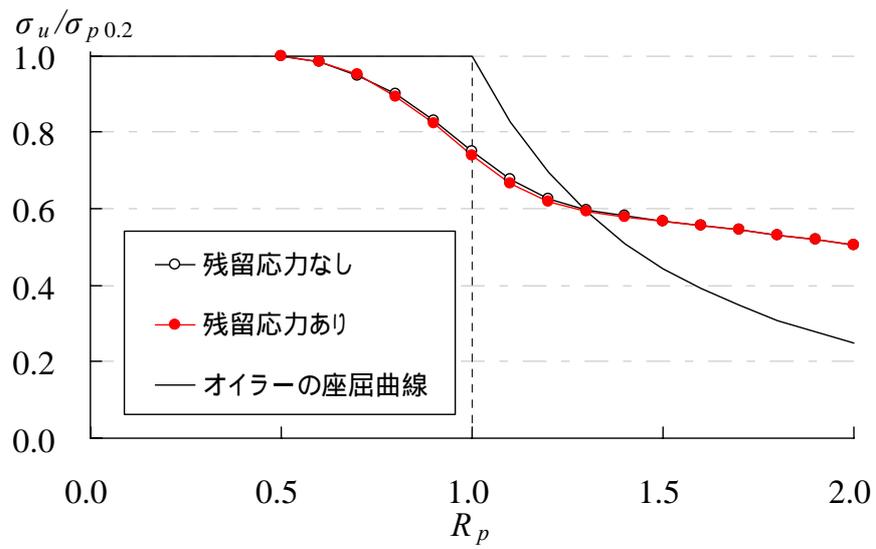
(a) $b=50\text{mm}$



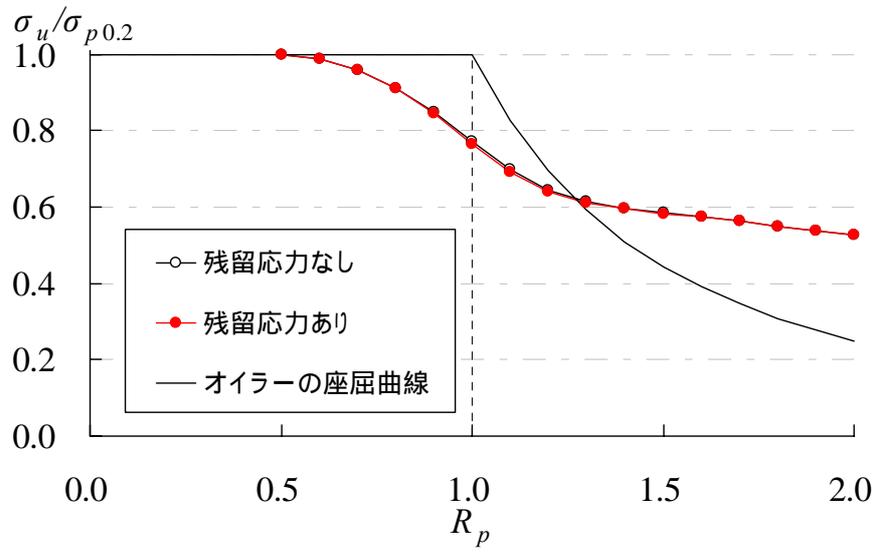
(b) $b=60\text{mm}$



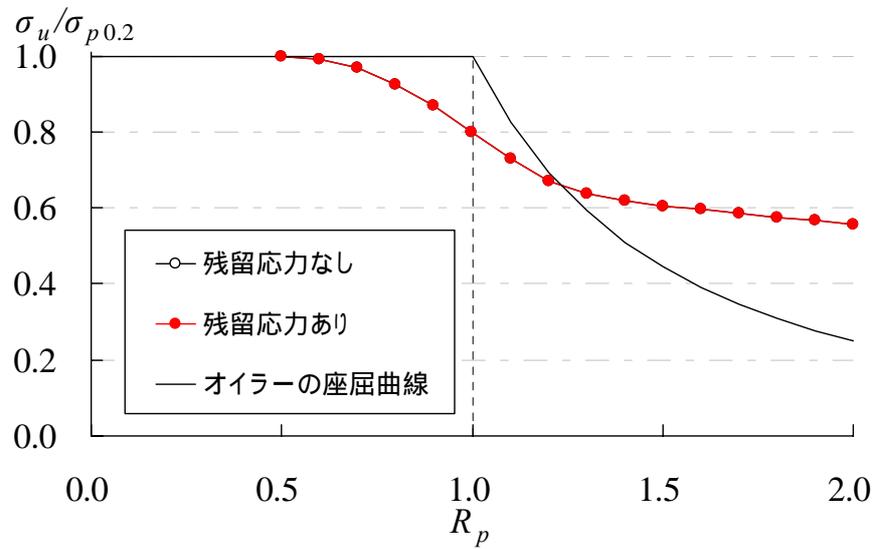
(c) $b=75\text{mm}$



(d) $b=100\text{mm}$



(e) $b=125\text{mm}$



(f) $b=200\text{mm}$

図-4.2 残留応力の影響

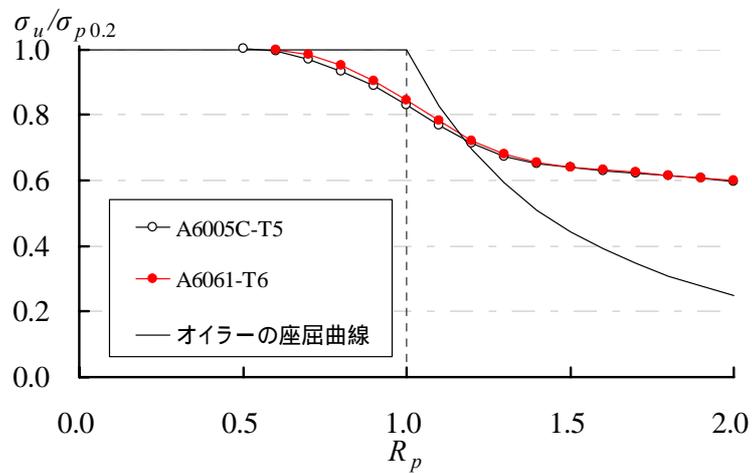
4.3 A6005C-T5 板と A6061-T6 板の耐荷力の比較

A6005C-T5 板と A6061-T6 板に対して、 $\sigma_u / \sigma_{p0.2} - R_p$ 関係の比較を図-4.3 に示す。板幅が 50mm の長方形板に対する結果が示されている。A6005C-T5 板に対する FEM 解析の数値データを付録 C に示す。

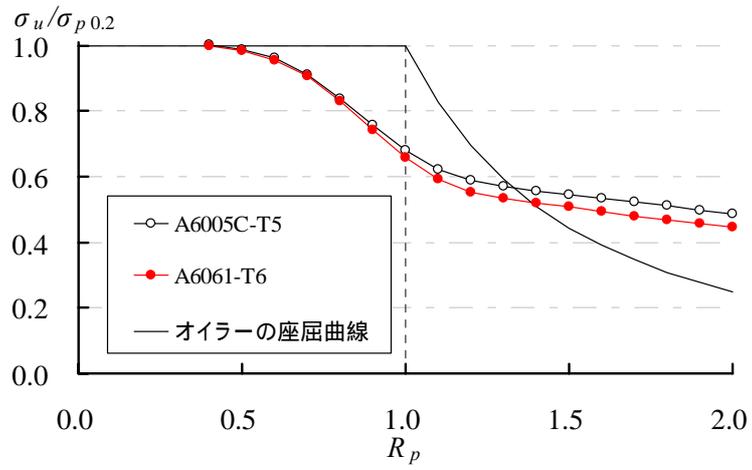
図-4.3(a) から分るように、非接合板においては、A6005C-T5 板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2} - R_p$ 関係が A6061-T6 板の関係にほぼ一致している。

図-4.3(b) から分かるように、残留応力が考慮されない接合板においては、A6061-T6 板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ が A6005C-T5 板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ より低下する。

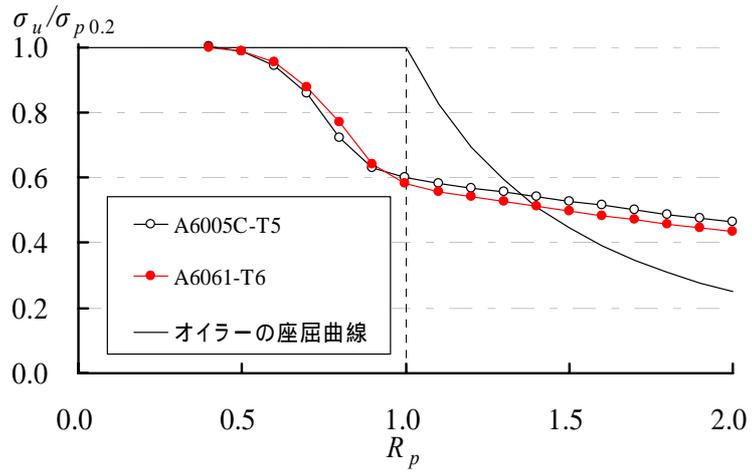
図-4.3(c) から分かるように、残留応力が考慮された接合板においては、 $0.6 < R_p < 0.9$ の範囲で A6005C-T5 板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ が A6061-T6 板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ より低く、 $R_p = 1.0$ の範囲で A6061-T6 の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ が A6005C-T5 板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ より低くなる。4.2 節で述べたように、残留応力の影響は $0.6 < R_p < 1.2$ で現れ、 $R_p \geq 1.2$ では残留応力の影響はない。したがって、 $0.6 < R_p < 0.9$ の範囲で、残留応力の影響は A6005C-T5 板の方が A6061-T6 板より大きく、 $R_p = 1.0$ の範囲で、残留応力の影響がなくなるため、A6061-T6 板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ が A6005C-T5 板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ より低下する。



(a) 非接合板



(b) 接合板（残留応力なし）



(c) 接合板（残留応力あり）

図-4.3 A6005C-T5 板と A6061-T6 板の耐荷力の比較

第5章 A5083-O 板の圧縮耐荷力

アルミニウム合金 A5083-O の非接合板と接合板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2} - R_p$ 関係を図-5.1 に示す。同図で、板幅 b に値が与えられている結果が接合板に対する耐荷力である。接合板には残留応力が考慮されている。FEM 解析の数値データを付録 D に示す。

図-5.1 から分るように、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低く、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圧縮残留応力が大きくなるからである。

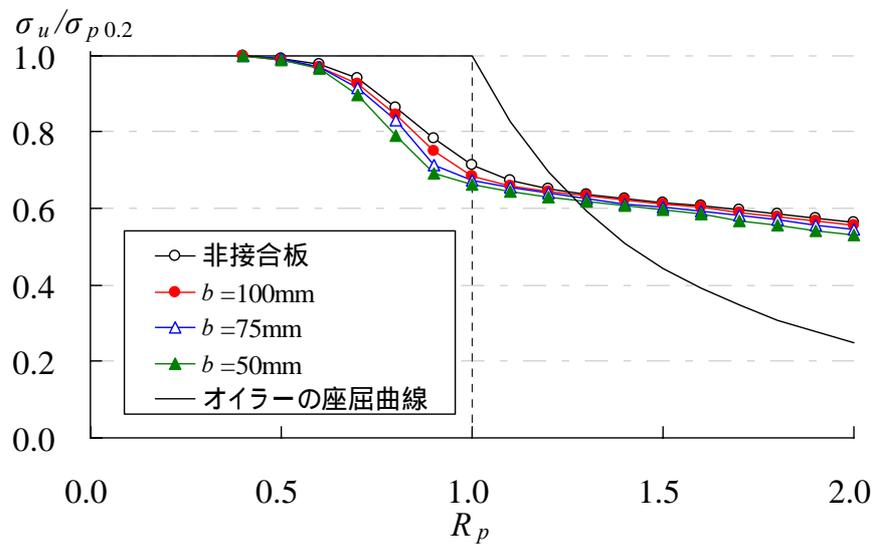


図-5.1 A5083-O 板の耐荷力

第 6 章 耐荷力曲線

6.1 耐荷力の定式化

アルミニウム合金 A6061-T6 , A6005C-T5 , A5083-O の自由突出板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ - R_p 関係は R_p のある値で $\sigma_u / \sigma_{p0.2} = 1.0$ に交差し , $0.65 < \sigma_u / \sigma_{p0.2} < 1.0$ の間で上向きの曲線 , $\sigma_u / \sigma_{p0.2} < 0.65$ でやや下向きの曲線になる . そこで自由突出板の耐荷力を表す曲線として , 次式を採用する .

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{p0.2}} = \begin{cases} 1 & (R_p \leq R_{cr}) \\ -0.35 \left(\frac{R_p - R_{cr}}{R_{0.65} - R_{cr}} \right)^2 + 1 & (R_{cr} \leq R_p \leq R_{0.65}) \\ 0.65 \left(\frac{R_{0.65}}{R_p} \right)^m & (R_{0.65} \leq R_p) \end{cases} \quad (6.1)$$

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

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

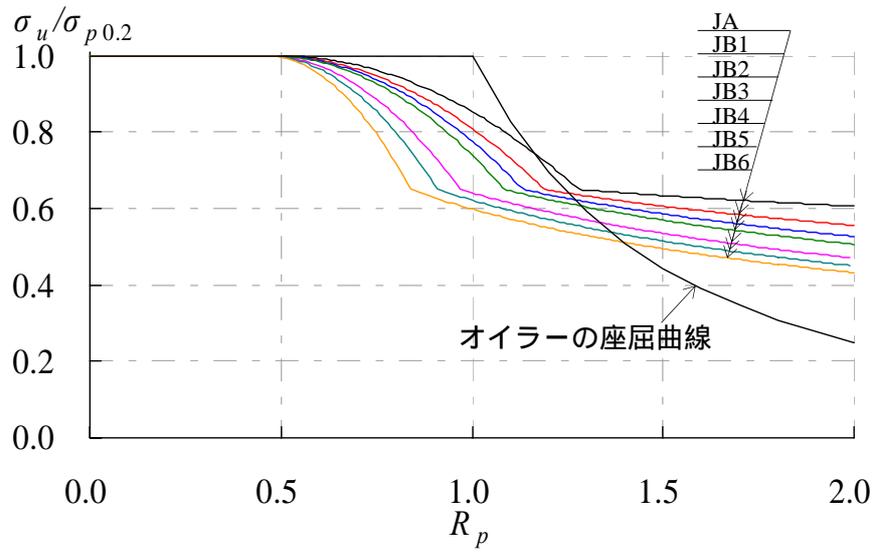
m : 定数

$0.65 < \sigma_u / \sigma_{p0.2} < 1.0$ の FEM 解析値に 2 次曲線を仮定し , これに最小 2 乗法を適用して得られる 2 次式を式(6.1)の中段の式の形式に変形して , R_{cr} および $R_{0.65}$ の値を求める . $\sigma_u / \sigma_{p0.2} < 0.65$ の FEM 解析値に対して , 式(6.1)の下段の式を仮定し , これに最小 2 乗法を適用して m の値を求める . A6061-T6 板 , A6005C-T5 板および A5083-O 板に対する 耐荷力曲線の区分と R_{cr} , $R_{0.65}$, m の値を表-6.1 に示す . さらに , これらの耐荷力曲線の比較を図-6.1 に示す .

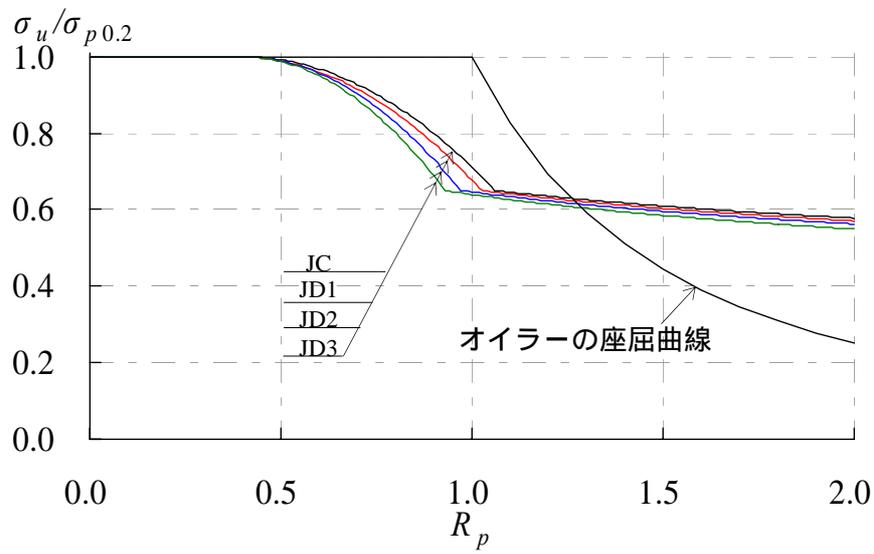
表-6.1 耐荷力曲線の区分と R_{cr} , $R_{0.65}$, m の値

| | | A6061-T6 A6005C-T6 | A5083-O | R_{cr} | $R_{0.65}$ | m |
|------|---------------|-----------------------|---------|----------|------------|------|
| 非接合板 | | JA | JC | 0.49 | 1.28 | 0.16 |
| 接合板 | 200 b | JB1 | JD1 | 0.48 | 1.18 | 0.29 |
| | 125 $b < 200$ | JB2 | | 0.47 | 1.13 | 0.37 |
| | 100 $b < 125$ | JB3 | | 0.47 | 1.08 | 0.41 |
| | 75 $b < 100$ | JB4 | JD2 | 0.47 | 0.98 | 0.45 |
| | 60 $b < 75$ | JB5 | JD3 | 0.47 | 0.92 | 0.47 |
| | 50 $b < 60$ | JB6 | | 0.46 | 0.84 | 0.47 |
| | | | | 0.40 | 1.06 | 0.19 |
| | | | | 0.40 | 1.02 | 0.20 |
| | | | | 0.40 | 0.97 | 0.20 |
| | | | | 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-6.1 耐荷力曲線の比較

式(6.1)が与える耐荷力曲線と FEM 解析値との比較を付録 E に示す。式(6.1)が与える耐荷力曲線は FEM 解析値を良く近似している。

図-4.1 のアルミニウム合金 A6061-T6 の非接合板の FEM 解析値が表-6.1 の JA に採用されている。図-4.2(a) , (b) , (c) , (d) , (e) , (f)において残留応力が考慮された FEM 解析値がそれぞれ、表-6.1 の JB6 , JB5 , JB4 , JB3 , JB2 , JB1 に採用されている。

図-4.3(a)に示すように、A6005C-T5 の非接合板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2} - R_p$ 関係は A6061-T6 のそれとよく一致している。図-4.3(c)に示すように、板幅が 50mm の接合板に対して、A6005C-T5 の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ が、 $R_p = 0.8$ で A6061-T6 の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ より幾分低いが、この低下は小さいので、A6005C-T5 板の耐荷力曲線の区分を A6061-T6 板の耐荷力曲線の区分と同じにしている。

図-5.1 のアルミニウム合金 A5083-O の非接合板の FEM 解析値が表-6.1 の JC に採用されている。図-5.1 の $b = 50\text{mm}$, 75mm , 100mm の FEM 解析値がそれぞれ、表-6.1 の JD3 , JD2 , JD1 に採用されている。

JAA 指針⁴⁾の圧縮を受ける自由突出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荷力は 0.2%耐力を保持していると想定している。しかし、表-6.1 から分かるように、アルミニウム合金 A6061-T6 と A6005C-T5 に対して、 R_{cr} の値は 0.46 から 0.49 であり、A5083-O に対するそれは 0.40 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。

6.2 Eurocode 9 の耐力曲線との比較

Eurocode 9⁹⁾において、自由突出板に対して規定される耐力曲線を次に示す。

$$\frac{\sigma}{\sigma_{p0.2}} = \begin{cases} 1 & (0 \leq R_p \leq R_{cr}) \\ \frac{Q_1}{R_p} - \frac{Q_2}{R_p^2} & (R_{cr} \leq R_p) \end{cases} \quad (6.2)$$

ここに、 Q_1, Q_2 ：定数

耐力曲線の区分ならびに Q_1, Q_2, R_{cr} の値を表-6.2 に示す。Eurocode 9 の耐力曲線において考慮されている初期たわみと残留応力は不明である。

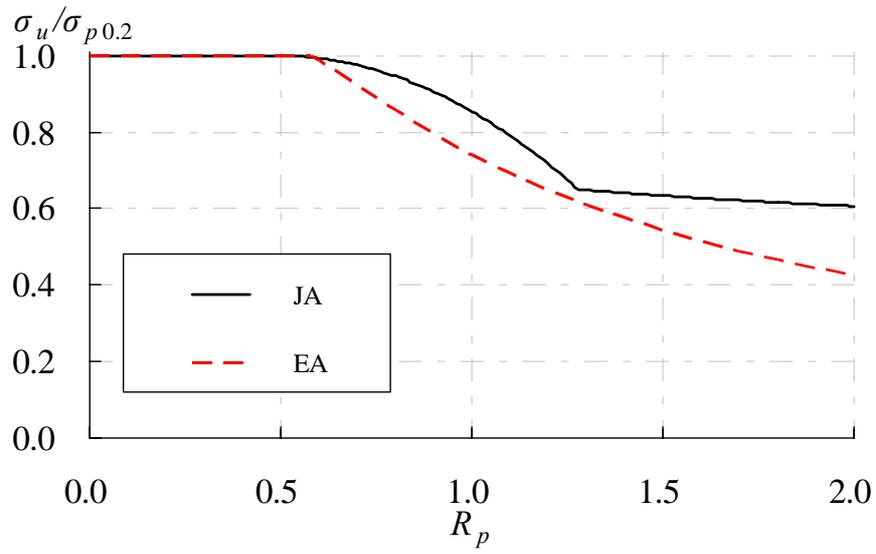
表-6.2 Eurocode 9 における耐力曲線の区分ならびに Q_1, Q_2, R_{cr} の値

| 板の区分 | 熱処理アルミニウム合金 | 非熱処理アルミニウム理合金 |
|------|-------------|---------------|
| 非接合板 | EA | EB |
| 接合板 | EB | EC |

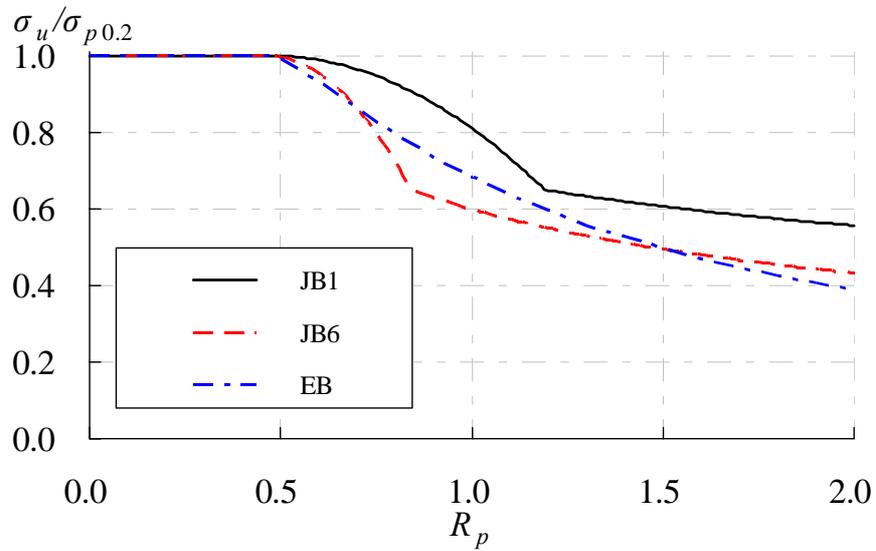
| 記号 | Q_1 | Q_2 | R_{cr} |
|----|-------|-------|----------|
| EA | 0.964 | 0.223 | 0.579 |
| EB | 0.868 | 0.186 | 0.482 |
| EC | 0.771 | 0.149 | 0.386 |

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 の耐力曲線と式(6.1)が与える耐力曲線との比較を図-6.2 に示す。非接合板においては、式(6.1)が与える耐力曲線 JA と Eurocode 9 の耐力曲線 EA は R_{cr} および $R_{0.65}$ 付近で近いが、 R_p が大きい領域では JA 曲線が EA 曲線より高い。接合板については、JB1 曲線と JB6 曲線の R_{cr} の値は EB 曲線のそれに近い。JB1 曲線は EB 曲線より高いが、JB6 は、 R_p が 0.7 から 1.5 の範囲で EB 曲線より低くなる。

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 の耐力曲線と式(6.1)が与える耐力曲線との比較を図-6.3 に示す。非接合板および接合板ともに、式(6.1)が与える耐力曲線と Eurocode 9 の耐力曲線は R_{cr} と $R_{0.65}$ 付近で近いが、 R_p が大きい領域では式(6.1)が与える耐力曲線が Eurocode 9 の耐力曲線より高い。

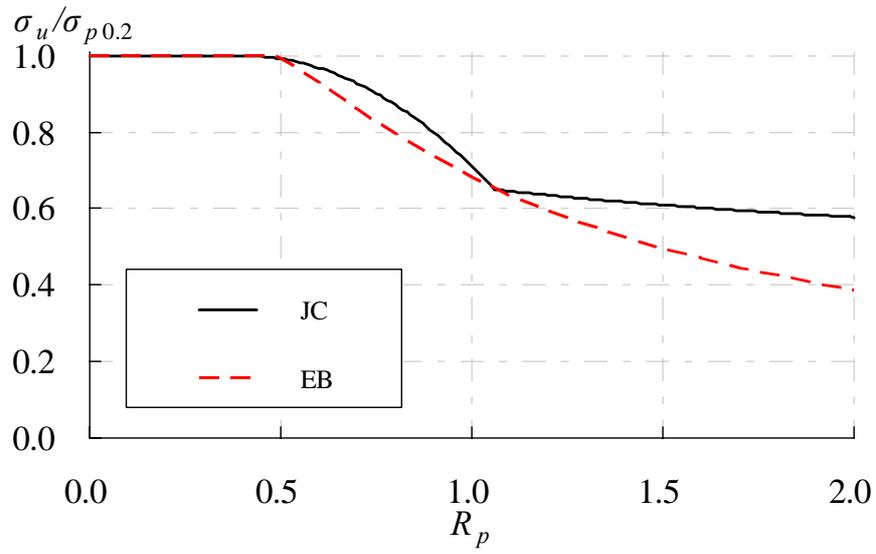


(a) 非接合板

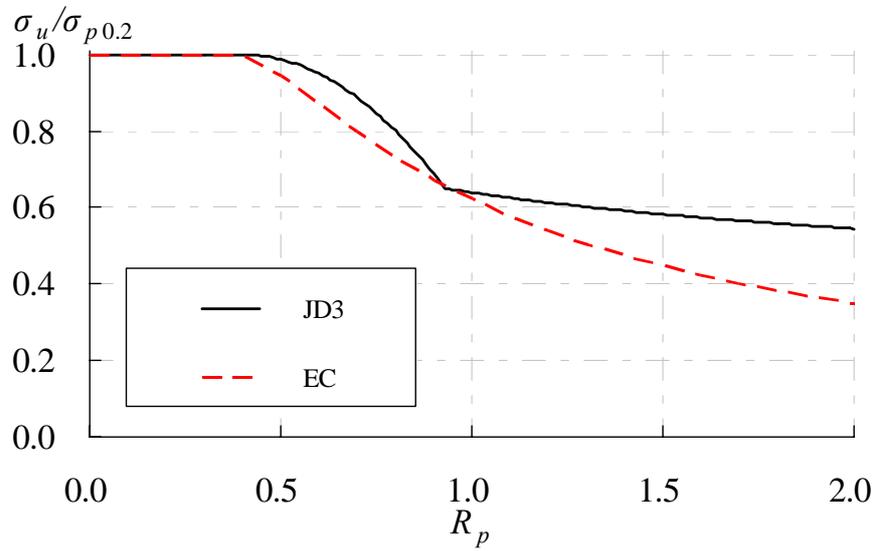


(b) 接合板

図-6.2 熱処理アルミニウム合金に対する Eurocode 9 の耐荷力曲線との比較



(a) 非接合板



(b) 接合板

図-6.3 非熱処理アルミニウム合金に対する Eurocode 9 の耐荷力曲線との比較

第7章 結論

本研究では、圧縮を受ける自由突出板の耐荷力を 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) アルミニウム合金 A6061-T6 の接合板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ (第3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。
- (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、 $0.6 < R_p < 1.2$ の範囲で残留応力が耐荷力を低下させるが、 $R_p > 1.2$ では、残留応力の影響はない。ここで R_p は幅厚比パラメータ(第3章参照)である。
- (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 板の關係にほぼ一致する。残留応力が考慮された、板幅が 50mm の接合板においては、 $0.6 < R_p < 0.9$ 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、 $R_p = 1.0$ 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 の接合板の耐荷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 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⁴⁾の規定値は見直しが必要である。
- (6) 本研究の成果に基づいて、耐荷力曲線を次式の形式で与えた。

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

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

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

m : 定数

耐荷力曲線の区分と R_{cr} , $R_{0.65}$, m の値を次表に示す。

| | | | |
|------|---------------|-----------------------|---------|
| | | A6061-T6 A6005C-T6 | A5083-O |
| 非接合板 | | JA | JC |
| 接合板 | 200 b | JB1 | JD1 |
| | 125 $b < 200$ | JB2 | |
| | 100 $b < 125$ | JB3 | |
| | 75 $b < 100$ | JB4 | JD2 |
| | 60 $b < 75$ | JB5 | JD3 |
| | 50 $b < 60$ | JB6 | |

* : b の単位 mm

| | 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 |

- (7) 本研究の耐荷力曲線の R_{cr} の値は Eurocode 9⁹⁾で規定される耐荷力曲線の R_{cr} の値に近い．さらに， $R_{0.65}$ 付近で，本研究の耐荷力曲線の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ は Eurocode 9 の耐荷力曲線の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ に近い．しかし，これ以外で両者は異なっている．

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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 - ひずみ関係の定式化および MIG 溶接と摩擦攪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.
- 7) 日本マーク: MARC, K6, 2005.
- 8) Column Research Committee of Japan: Handbook of Structural Stability, Corona Publishing Company, Ltd., Tokyo, Japan, Part III Plates, 1971.
- 9) Eurocode 9: Design of Aluminum Structures – Part 1-1: General rules – General rules and rules for buildings, 1999.

付録A 図-4.1 の FEM 解析の数値データ

σ_u (MPa)

| R_p | 非接合板 | 接合板 | | | | | |
|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | b (mm) | | | | | |
| | | 50 | 60 | 75 | 100 | 125 | 200 |
| 0.30 | - | 177.8 | 190.0 | 200.2 | - | - | - |
| 0.40 | - | 176.3 | 188.1 | 199.8 | 211.5 | 218.9 | - |
| 0.50 | 245.7 | 174.0 | 186.2 | 198.7 | 210.3 | 217.6 | 228.0 |
| 0.60 | 244.5 | 168.3 | 181.3 | 195.0 | 207.4 | 215.2 | 226.2 |
| 0.70 | 241.1 | 160.0 | 173.2 | 187.3 | 200.0 | 208.5 | 220.7 |
| 0.80 | 232.9 | 146.8 | 160.7 | 176.0 | 189.5 | 198.5 | 211.1 |
| 0.90 | 221.8 | 130.9 | 144.1 | 160.3 | 175.1 | 184.8 | 198.6 |
| 1.00 | 207.5 | 116.0 | 128.6 | 142.3 | 157.9 | 168.1 | 182.6 |
| 1.10 | 191.4 | 104.6 | 115.7 | 126.7 | 142.9 | 152.2 | 166.3 |
| 1.20 | 176.7 | 97.8 | 107.6 | 116.4 | 131.9 | 140.4 | 153.2 |
| 1.30 | 166.4 | 94.5 | 103.6 | 112.2 | 125.8 | 133.6 | 145.1 |
| 1.40 | 160.5 | 91.8 | 100.7 | 109.3 | 122.4 | 129.9 | 140.8 |
| 1.50 | 157.0 | 89.6 | 98.1 | 107.1 | 119.8 | 127.1 | 138.1 |
| 1.60 | 154.9 | 87.2 | 95.5 | 104.6 | 117.2 | 124.7 | 135.9 |
| 1.70 | 152.9 | 84.9 | 93.1 | 102.0 | 114.8 | 122.3 | 133.7 |
| 1.80 | 150.8 | 82.8 | 90.8 | 99.4 | 112.1 | 119.7 | 131.4 |
| 1.90 | 148.9 | 80.6 | 88.2 | 96.8 | 109.3 | 117.0 | 129.0 |
| 2.00 | 146.8 | 79.0 | 85.9 | 94.3 | 106.6 | 114.4 | 126.5 |

付録 B 図-4.2 の FEM 解析の数値データ

| R_p | σ_u (MPa) | | | | | |
|-------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | b (mm) | | | | | |
| | 50 | 60 | 75 | 100 | 125 | 200 |
| 0.30 | 177.7 | 189.9 | - | - | - | - |
| 0.40 | 176.1 | 187.9 | 199.8 | - | - | - |
| 0.50 | 174.4 | 186.4 | 198.6 | 210.2 | 217.5 | 227.9 |
| 0.60 | 168.2 | 182.1 | 195.5 | 207.6 | 215.2 | 226.2 |
| 0.70 | 154.6 | 171.0 | 187.1 | 200.3 | 208.8 | 220.9 |
| 0.80 | 135.7 | 156.1 | 173.6 | 188.5 | 198.0 | 211.0 |
| 0.90 | 113.0 | 137.1 | 157.4 | 173.3 | 183.7 | 197.9 |
| 1.00 | 102.6 | 118.6 | 137.6 | 155.7 | 166.7 | 181.7 |
| 1.10 | 98.2 | 109.9 | 121.1 | 140.2 | 150.5 | 165.3 |
| 1.20 | 95.4 | 105.6 | 115.0 | 130.5 | 139.2 | 152.4 |
| 1.30 | 92.9 | 102.6 | 111.7 | 125.3 | 133.2 | 144.8 |
| 1.40 | 90.2 | 99.9 | 109.0 | 122.1 | 129.7 | 140.7 |
| 1.50 | 87.9 | 97.4 | 107.0 | 119.7 | 127.0 | 138.0 |
| 1.60 | 85.4 | 94.8 | 104.5 | 117.2 | 124.7 | 135.9 |
| 1.70 | 83.0 | 92.4 | 101.9 | 114.8 | 122.3 | 133.7 |
| 1.80 | 80.8 | 90.0 | 99.4 | 112.1 | 119.7 | 131.4 |
| 1.90 | 78.5 | 87.4 | 96.8 | 109.4 | 117.0 | 129.0 |
| 2.00 | 76.9 | 85.2 | 94.3 | 106.7 | 114.5 | 126.5 |

付録 C 図-4.3 の FEM 解析の数値データ

σ_u (MPa)

| R_p | 非接合板 | 接合板 $b = 50$ mm | |
|-------|-------|--------------------|------------|
| | | 残留応力 なし | 残留応力 あり |
| 0.40 | 177.0 | 136.8 | 136.7 |
| 0.50 | 175.2 | 134.9 | 134.8 |
| 0.60 | 173.9 | 131.3 | 128.9 |
| 0.70 | 169.8 | 124.4 | 117.1 |
| 0.80 | 163.3 | 114.3 | 98.8 |
| 0.90 | 155.3 | 103.4 | 85.9 |
| 1.00 | 145.6 | 92.7 | 82.0 |
| 1.10 | 134.5 | 84.8 | 79.5 |
| 1.20 | 124.9 | 80.3 | 77.5 |
| 1.30 | 117.9 | 77.7 | 75.8 |
| 1.40 | 114.0 | 75.8 | 73.9 |
| 1.50 | 112.0 | 74.2 | 72.0 |
| 1.60 | 110.3 | 73.1 | 70.4 |
| 1.70 | 109.0 | 71.5 | 68.5 |
| 1.80 | 107.4 | 69.8 | 66.6 |
| 1.90 | 106.1 | 67.9 | 64.7 |
| 2.00 | 104.3 | 66.5 | 63.3 |

付録 D 図-5.1 の FEM 解析の数値データ

σ_u (MPa)

| R_p | 非接合板 | 接合板 | | |
|-------|-------|----------|-------|-------|
| | | b (mm) | | |
| | | 50 | 75 | 100 |
| 0.30 | 127.9 | 129.1 | 127.1 | 127.9 |
| 0.40 | 126.8 | 126.8 | 126.9 | 126.8 |
| 0.50 | 125.8 | 125.6 | 125.7 | 125.7 |
| 0.60 | 124.0 | 122.8 | 123.2 | 123.2 |
| 0.70 | 119.2 | 114.0 | 116.1 | 117.5 |
| 0.80 | 109.7 | 100.2 | 105.3 | 107.5 |
| 0.90 | 99.5 | 87.9 | 90.8 | 95.4 |
| 1.00 | 90.8 | 84.1 | 85.6 | 87.1 |
| 1.10 | 85.5 | 81.6 | 83.0 | 83.8 |
| 1.20 | 82.6 | 80.1 | 81.3 | 81.7 |
| 1.30 | 80.8 | 78.7 | 79.7 | 80.2 |
| 1.40 | 79.5 | 77.3 | 77.8 | 79.0 |
| 1.50 | 78.3 | 75.8 | 76.8 | 77.8 |
| 1.60 | 77.2 | 74.1 | 75.3 | 76.6 |
| 1.70 | 75.8 | 72.2 | 73.9 | 75.0 |
| 1.80 | 74.5 | 70.7 | 72.4 | 73.5 |
| 1.90 | 73.2 | 69.0 | 70.8 | 72.0 |
| 2.00 | 71.8 | 67.5 | 69.4 | 70.5 |

付録 E 耐荷力曲線と FEM 解析値との比較

