

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 15

2010年3月

大阪大学大学院工学研究科

小笠原康二，大倉一郎

概要

本研究では、面内曲げを受ける両縁単純支持板の耐荷力を FEM による弾塑性有限変位解析によって明らかにする。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 と 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と初期たわみ、熱処理アルミニウム合金においては接合部の強度低下を考慮する。本研究の成果に基づいて、面内曲げを受ける両縁単純支持板の耐荷力曲線を与える。

目次

第 1 章 序論	・ ・ ・ 1
第 2 章 接合方法と接合位置	・ ・ ・ 1
第 3 章 FEM による弾塑性有限変位解析	・ ・ ・ 4
3.1 初期たわみ	・ ・ ・ 4
3.2 残留応力	・ ・ ・ 4
3.3 要素分割	・ ・ ・ 6
3.4 縦横比の影響	・ ・ ・ 7
第 4 章 耐荷力表示で使用されるパラメータ	・ ・ ・ 9
第 5 章 6000 系アルミニウム合金板の曲げ耐荷力	・ ・ ・ 11
5.1 接合位置の影響	・ ・ ・ 11
5.2 残留応力の影響	・ ・ ・ 14
5.3 接合方法の違い	・ ・ ・ 19
5.4 A6005C-T5 板と A6061-T6 板の耐荷力の比較	・ ・ ・ 20
第 6 章 A5083-O 板の曲げ耐荷力	・ ・ ・ 22
第 7 章 耐荷力曲線	・ ・ ・ 24
第 8 章 結論	・ ・ ・ 27
参考文献	・ ・ ・ 29
付録 A 全塑性モーメントの誘導	・ ・ ・ 30
付録 B 図-5.1 と 5.2 の FEM 解析の数値データ	・ ・ ・ 33
付録 C 図-5.3, 5.4, 5.5, 5.6 の FEM 解析の数値データ	・ ・ ・ 35
付録 D 図-5.7 の FEM 解析の数値データ	・ ・ ・ 36
付録 E 図-5.8 の FEM 解析の数値データ	・ ・ ・ 37
付録 F 図-6.1 と 6.2 の FEM 解析の数値データ	・ ・ ・ 38
付録 G 耐荷力曲線と FEM 解析値との比較	・ ・ ・ 39

第1章 序論

ALST 研究レポート 10¹⁾では、圧縮を受ける、両縁支持されたアルミニウム合金板の耐荷力が明らかにされた。本研究レポートでは、曲げを受ける、両縁支持されたアルミニウム合金板の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 と同じで、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。

第2章 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-2.1 に示す。図-2.1(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²⁾。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-2.1(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-2.1(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-2.1(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-2.1(d)は、T 型断面の押出型材と摩擦攪拌接合を用いて、図-2.1(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ない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-2.1(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-2.1(b)、(c)、(d)の斜線が施された部分が強度低下が生じる範囲であり、接合中心から各側 25mm の範囲の強度が低下する^{3),4)}。図-2.1(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-2.1(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-2.1(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 25mm で、合計 50mm の範囲の強度が低下する。

本研究では、図-2.2 に示す、接合方法と接合位置を考慮して、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-2.2(a)、(b)、(c)、(d)は、それぞれ図-2.1(a)、(b)、(c)、(d)の接合方法に対応する。

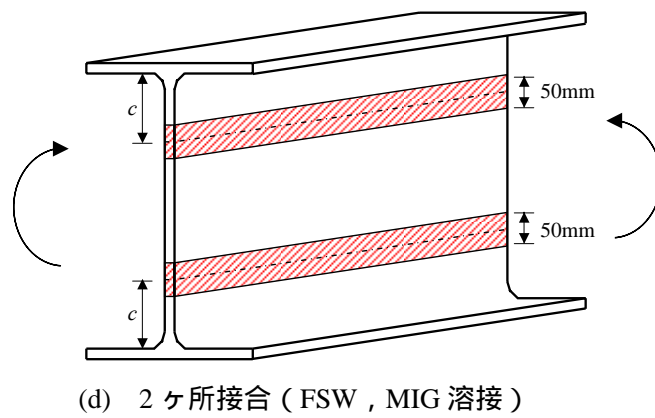
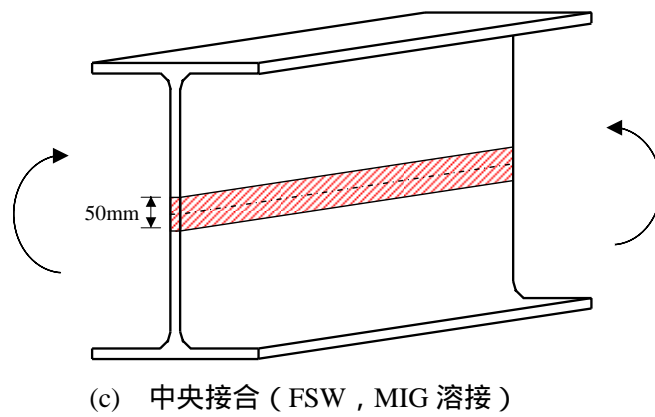
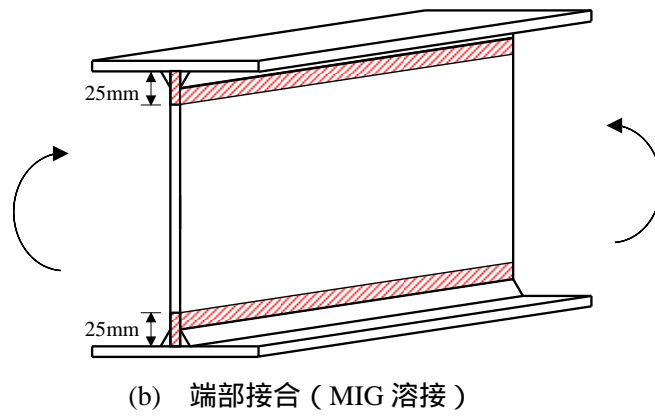
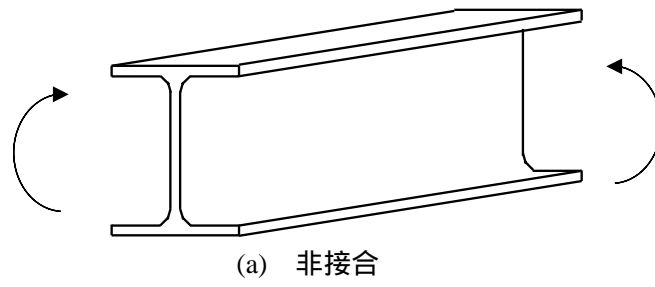
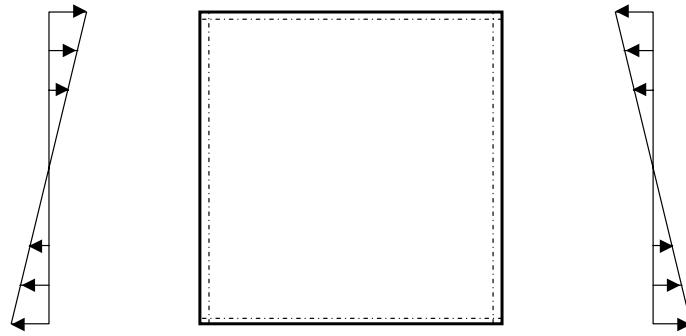
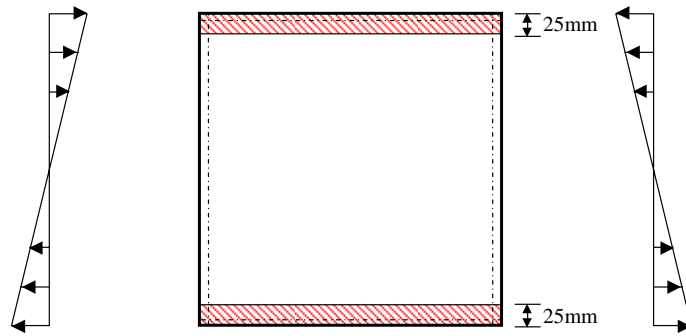


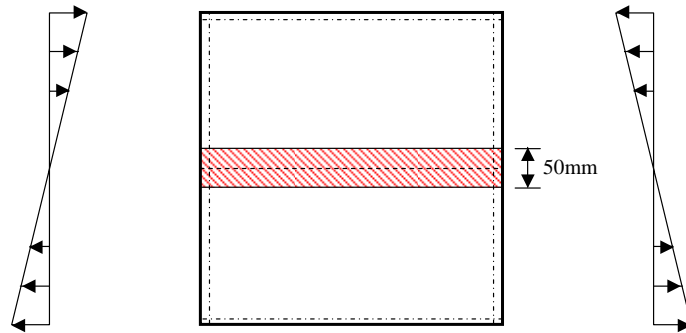
図-2.1 アルミニウム合金桁の製作方法



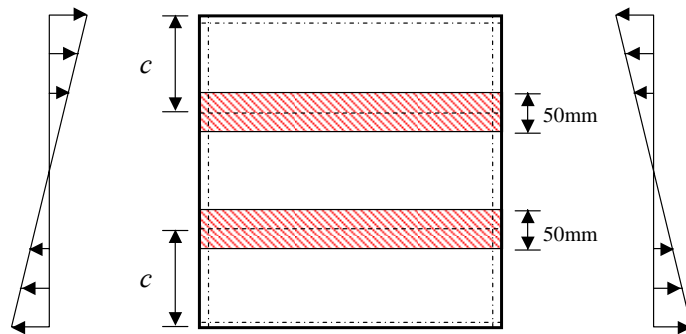
(a) 非接合板



(b) 端部接合板



(c) 中央接合板



(d) 2ヶ所接合板

図-2.2 面内曲げを受ける両縁支持板

第3章 FEMによる弾塑性有限変位解析

3.1 初期たわみ

図-3.1を参照して、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。

$$w_0 = \frac{b}{250} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (2.1)$$

ここに、 a : 面内曲げの作用方向の長方形板の長さ

b : 面内曲げの作用直角方向の長方形板の長さ

式(2.1)から分るように、最大初期たわみは長方形板の中央で $b/250$ である。最大初期たわみの大きさは、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）⁵⁾（以後、JAA指針と呼ぶ）で規定される桁ウェブの製作精度に対応している。

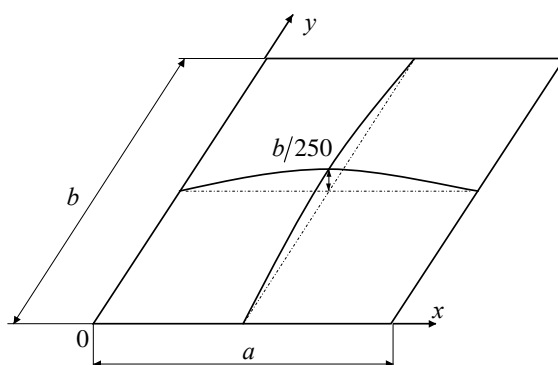


図-3.1 初期たわみ

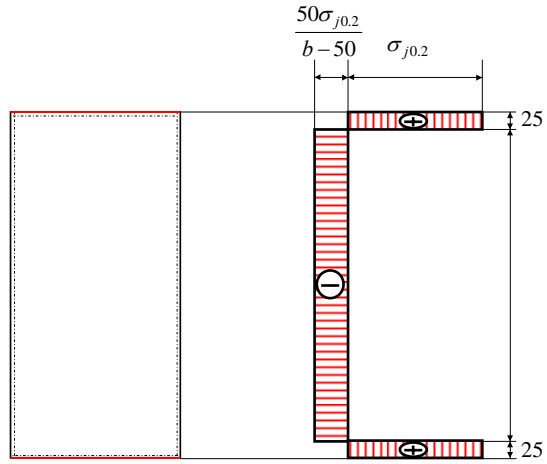
3.2 残留応力

MIG溶接または摩擦攪拌接合による突合せ接合によって製作される板の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を示す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³⁾。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-3.2に示す。

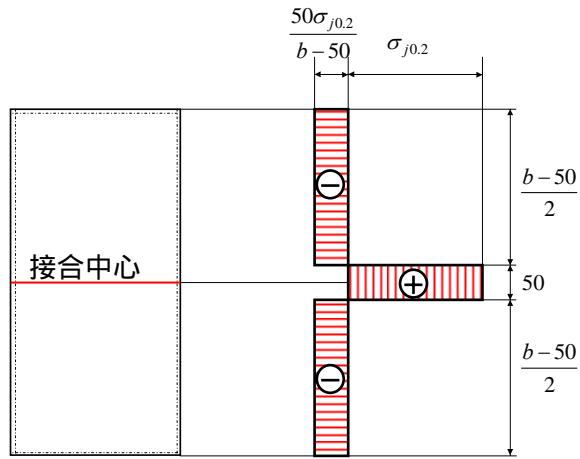
図-3.2(a)の端部接合板の場合、各縁から25mmの範囲が、 $\sigma_{j0.2}$ の引張残留応力であり、それから離れた位置では、 $50\sigma_{j0.2}/(b-50)$ の圧縮残留応力である。ここで、 $\sigma_{j0.2}$ は接合部の0.2%耐力であり、 b は板幅（単位：mm）である。

図-3.2(b)の中央接合板の場合、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。

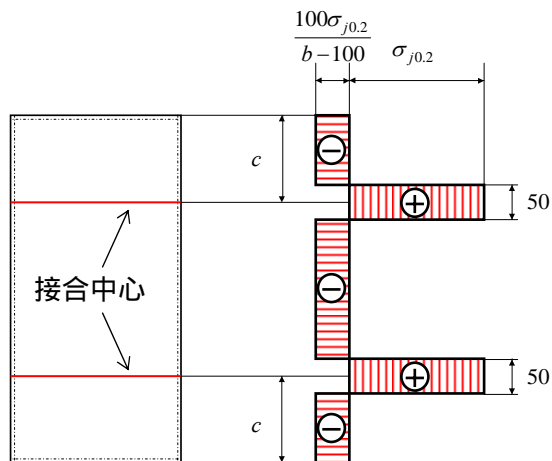
図-3.2(c)の2ヶ所接合板の場合、各ヶ所の接合中心の各側25mmの範囲が、 $\sigma_{j0.2}$ の引張残留応力であり、この引張残留応力とつり合う圧縮残留応力の大きさは $100\sigma_{j0.2}/(b-100)$ である。



(a) 端部接合板



(b) 中央接合板



(c) 2ヶ所接合板

図-3.2 残留応力分布

3.3 要素分割

面内曲げを受ける 4 辺単純支持された長方形板の弾塑性有限変位解析を汎用有限要素解析プログラム MARC⁶⁾を用いて行なう。要素分割を図-3.3 に示す。解析対象の対称性より長方形板の左側半分を要素分割する。図-3.4 を参照して、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。これを実現させるために、 $x = 0$ の辺に剛棒を設け、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 (MARC 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。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。

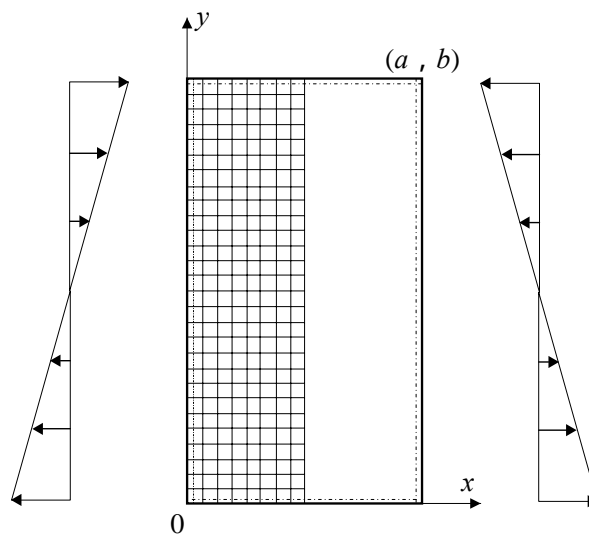


図-3.3 要素分割

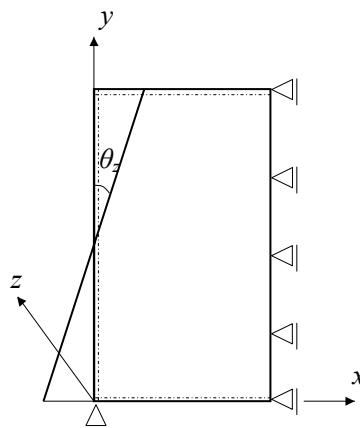


図-3.4 境界条件

耐荷力と要素分割数の関係を図-3.4 に示す．これは，アルミニウム合金が A6061-T6 で， $a=400\text{mm}$ ， $b=800\text{mm}$ の端部接合板の左側半分を， 8×32 ， 16×64 ， 24×96 に要素分割して得られる結果である．この解析においては図-3.2(a)の残留応力が考慮されている．ここで， 8×32 において，8 は x 軸方向の要素分割数，32 は y 軸方向の要素分割数を表す．端部接合板の接合部の幅は一定値 25mm であるため，接合部の板幅方向の要素分割は， 8×32 ， 16×64 ， 24×96 の要素分割に対して，それぞれ 1 要素，2 要素，3 要素になる．図-3.4 で， σ_u は，FEM 解析において，荷重が増加しなくなったときの最大曲げモーメント M_u を長方形板の弾性断面係数 W で除して得られる値である． M_u は， $(0, b/2)$ 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る． $\sigma_{p0.2}$ は曲げを受ける板の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る．両者とも 4 章で詳述される．

図-3.4 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依わず同じ値をとる．したがって，接合部 25mm の要素分割数は 1 要素で十分であるといえる．中央接合板および 2 ヶ所接合板の場合，接合部の幅が 50mm であるため，50mm 幅の接合部を 2 要素で分割する．

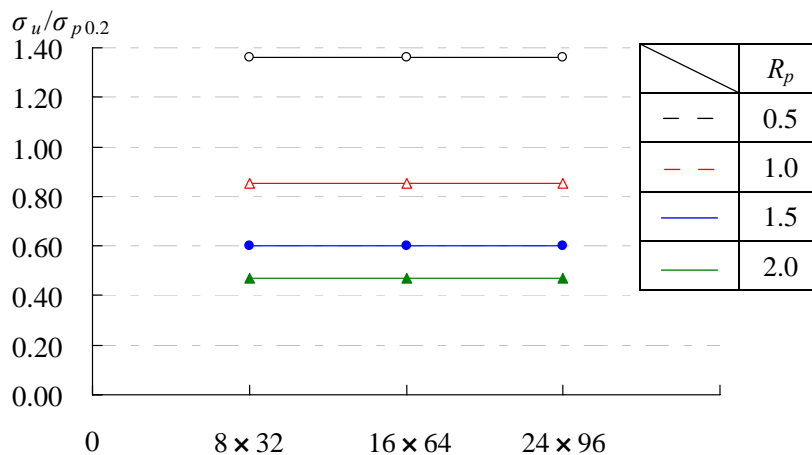


図-3.4 要素分割数

3.4 縦横比の影響

$\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ と縦横比 a/b の関係を図-3.5 に示す．アルミニウム合金は A6061-T6 で， $b=800\text{mm}$ の端部接合板で，図-3.2(a)の残留応力が考慮されている．要素分割は 8×32 である． $R_p=0.5$ の場合， a/b が小さくなるに従って $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が少しずつ低下する． $R_p=1.0$ と 1.5 の場合， $a/b=0.5$ で $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は最小値をとる． $R_p=2.0$ の場合， $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は $a/b=0.4$ で最小値をとるが， $a/b=0.5$ に対する値との差はわずかである．したがって，5 章と 6 章では， $a/b=0.5$ の長方形板に対して FEM 解析を行なう．ただし後述するように，2 ヶ所接合板の一部で， $a/b=0.5$ で適切な解が得られない場合， $a/b=0.4$ または 0.3 で再計算を行なう．

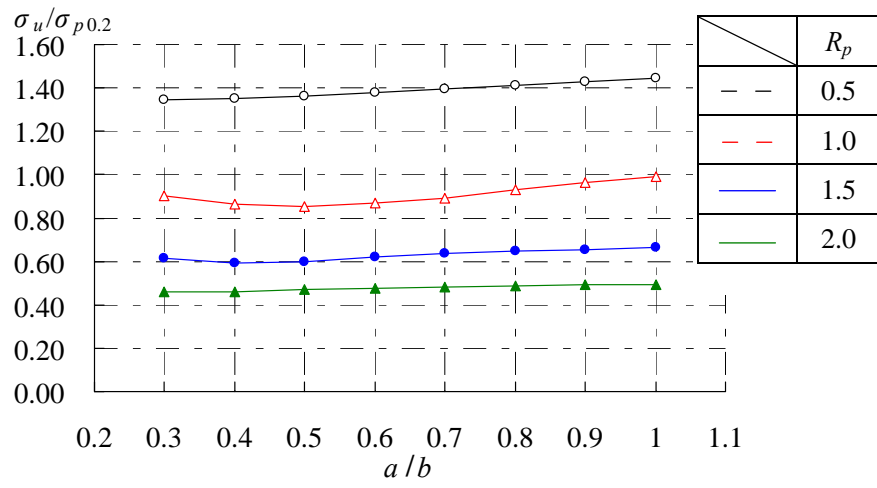


図-3.5 耐力と縦横比の関係

第 4 章 耐荷力表示で使用されるパラメータ

次式に示すように，FEM 解析で得られる最大曲げモーメント M_u を長方形板の弾性断面係数 W で除して得られる σ_u を耐荷力と定義する．

$$\sigma_u = \frac{M_u}{W} \quad (4.1)$$

ここに，
 σ_u : 耐荷力
 M_u : 最大曲げモーメント

$$W = \frac{b^2 t}{6} \quad \text{: 長方形板の弾性断面係数} \quad (4.2)$$

b : 長方形板の板幅
 t : 長方形板の板厚

アルミニウム合金 A6061-T6 と A6005C-T5 の接合部は強度低下を起こす．したがって，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，非接合板，端部接合板，中央接合板および 2ヶ所接合板に対して次のように与えられる．

$$M_p = Z \sigma_{p0.2} \quad (4.3)$$

ここに，
 $Z = \frac{b^2 t}{4}$: 長方形板の塑性断面係数 (4.4)

非接合板 : $\sigma_{p0.2} = \sigma_{0.2}$ (4.5)

端部接合板 : $\sigma_{p0.2} = \left(1 - \frac{100}{b} + \frac{2500}{b^2}\right) \sigma_{0.2} + \left(\frac{100}{b} - \frac{25}{b^2}\right) \sigma_{j0.2}$ (4.6)

中央接合板 : $\sigma_{p0.2} = \left(1 - \frac{2500}{b^2}\right) \sigma_{0.2} + \frac{2500}{b^2} \sigma_{j0.2}$ (4.7)

2ヶ所接合板 : $\sigma_{p0.2} = \left(1 - \frac{200}{b} + \frac{400c}{b^2}\right) \sigma_{0.2} + \left(\frac{200}{b} - \frac{400c}{b^2}\right) \sigma_{j0.2}$ (4.8)

$\sigma_{0.2}$: 母材の 0.2% 耐力

$\sigma_{j0.2}$: 接合部の 0.2% 耐力

b : 板幅 (単位: mm)

c : 長方形板の各縁から接合中心までの距離 (単位: mm)

t : 長方形板の板厚 (単位: mm)

式(4.5)～(4.8)の誘導を付録 A に示す．

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(4.3)と(4.5)で与えられる．

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(4.1)の M_u に式(4.3)の M_p を用いて次式を得る．

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{p0.2}} = 1.5 \quad (4.9)$$

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．したがって次章以下で述べる耐荷力は $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ で表示される．

他方，長方形板の幅厚比パラメータは， $\sigma_{p0.2}$ を用いることにより次式で定義される．

$$R_p = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)\sigma_{p0.2}}{23.9 E}} \beta \quad (4.10)$$

ここに，
 R_p : $\sigma_{p0.2}$ を用いた幅厚比パラメータ
 μ : ポアソン比 (=0.3)
 E : ヤング係数 (=70GPa)
 β : 幅厚比 (=b/t)

第 5 章 6000 系アルミニウム合金板の曲げ耐荷力

5.1 接合位置の影響

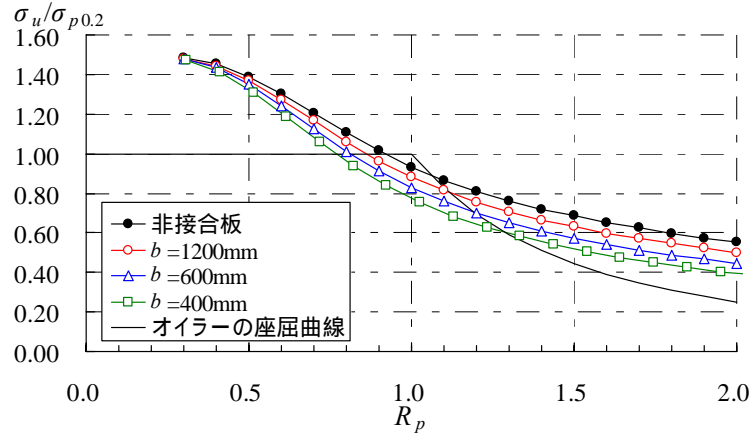
アルミニウム合金 A6061-T6 の端部接合板，中央接合板および 2 ヶ所接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2} - R_p$ 関係を図-5.1 に示す．中央接合板および 2 ヶ所接合板は摩擦攪拌接合で接合されているので，ひずみ硬化パラメータ n に対して 10 を用いている．最大初期たわみ $w_{0\max}$ を $b/250$ とし，残留応力を考慮していない．FEM 解析の数値データを付録 B に示す．

図-5.1(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，板幅が小さくなると，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%耐荷力が母材のその約半分まで低下した接合部が位置しているためと考えられる．

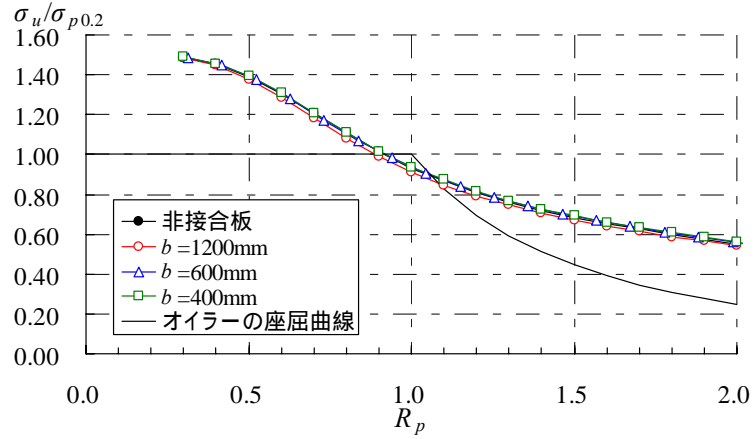
図-5.1(b)から分るように，中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は，板幅に関係なく，非接合板のそれにほぼ等しい．これは，面内曲げ応力の作用が小さい位置に接合位置が存在しているためである．

図-5.1(c)と(d)から分るように， $c=25\text{mm}$ および $c=b/12$ の 2 ヶ所接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ 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， c が小さいとき，接合位置が長方形板の縁に近いこと，前述の端部接合板における接合位置の影響と同様の影響が現れるからである．図-5.1(e)から分るように， $c=b/6$ の 2 ヶ所接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は，板幅にかかわらず，非接合板のそれにほぼ等しい．これは， c が大きいとき，接合位置が長方形板の中央に近いこと，前述の中央接合板における接合位置の影響と同様の影響が現れるからである．

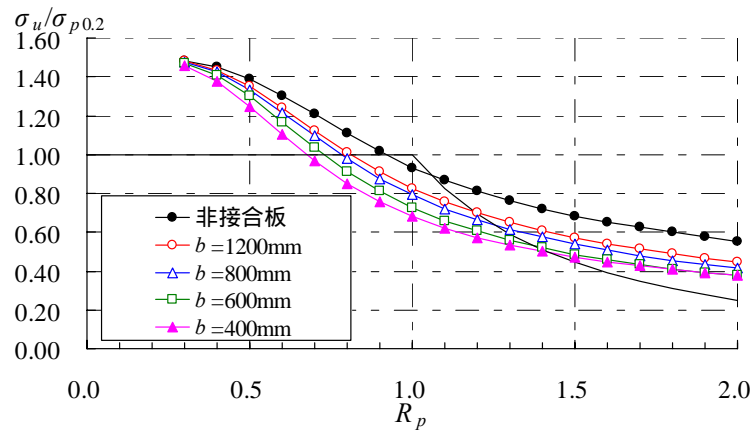
板幅が 400mm および 600mm の 2 ヶ所接合板において，接合位置が耐荷力に与える影響を図-5.2 に示す．FEM 解析の数値データを付録 B に示す．接合位置 c が大きくなる，すなわち，接合位置が長方形板の縁から遠ざかるに従って， $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は上昇する．



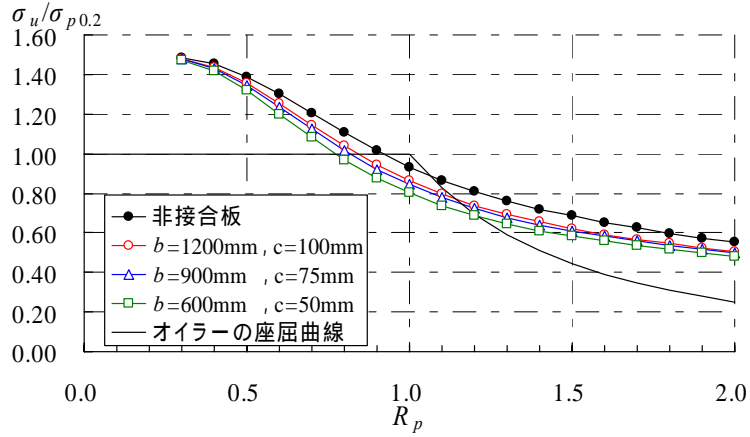
(a) 端部接合板



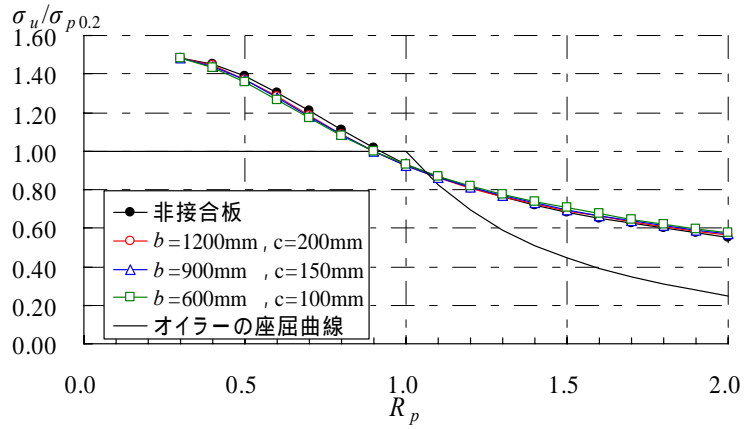
(b) 中央接合板



(c) $c=25\text{mm}$ の2ヶ所接合板

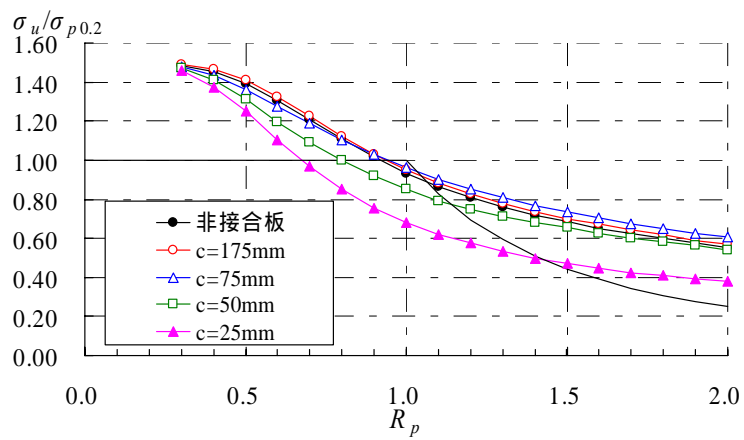


(d) $c=b/12$ の 2 ヶ所接合板

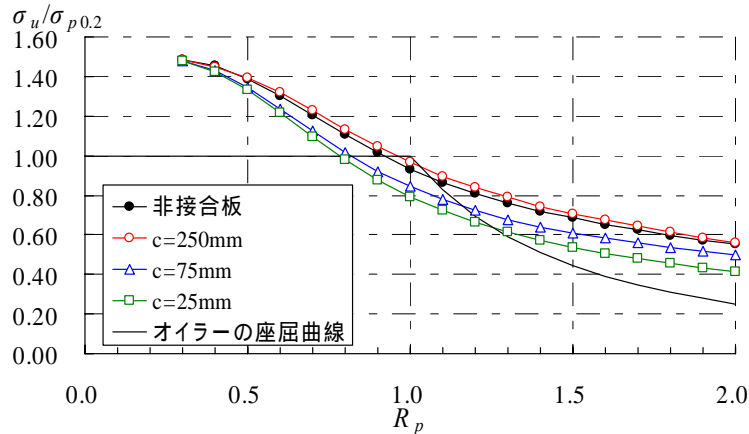


(e) $c=b/6$ の 2 ヶ所接合板

図-5.1 接合位置の影響 (A6061-T6)



(a) $b=400\text{mm}$



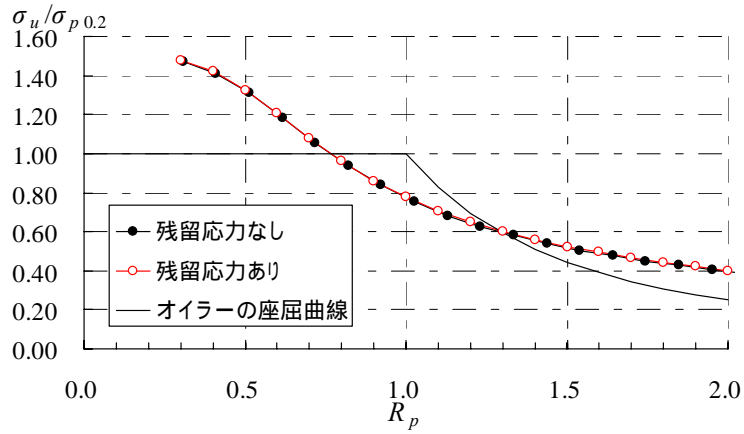
(b) $b=600\text{m}$

図-5.2 接合位置が2ヶ所接合板の耐荷力に与える影響 (A6061-T6)

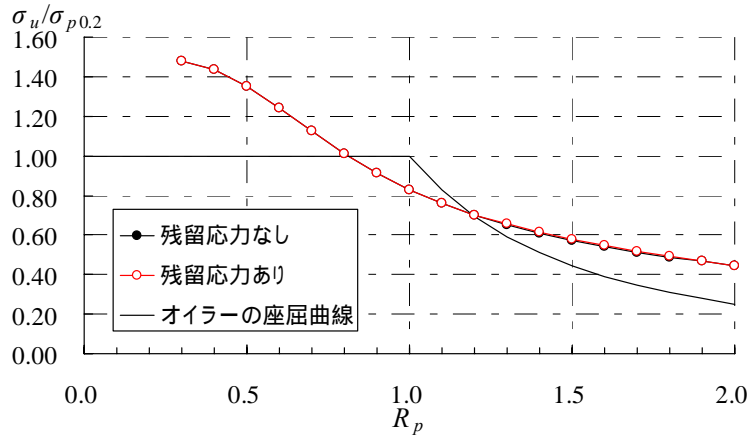
5.2 残留応力の影響

アルミニウム合金 A6061-T6 の端部接合板，中央接合板， $c=25\text{mm}$ および $c=b/6$ の2ヶ所接合板に対して，残留応力が考慮された $\sigma_u/\sigma_{p0.2} - R_p$ 関係をそれぞれ図-5.3，5.4，5.5，5.6 に示す．中央接合板および2ヶ所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，最大初期たわみ $w_{0\text{max}}$ を $b/250$ としている．残留応力が考慮された場合に対する FEM 解析の数値データを付録 C に示す．同付録に示すように，2ヶ所接合板においては，一部，縦横比 $a/b=0.4$ に対して FEM 解析を行なっている． $a/b=0.5$ で計算すると，無荷荷の状態では，初期たわみと残留応力が自己平衡をとるとき，スナップバックが発生する場合，荷重を増加させていく過程でスナップバックが発生する場合， x 軸方向に高次の面外波形（対称性の境界条件を与えているため3次のモード）を示して終局状態を向える場合がある．この場合，自己平衡がとられた後の面外たわみ形状が式(2.1)の初期たわみ形状と異なるため，この場合，最大荷重が上昇するため， $a/b=0.4$ で再計算を行なっている．

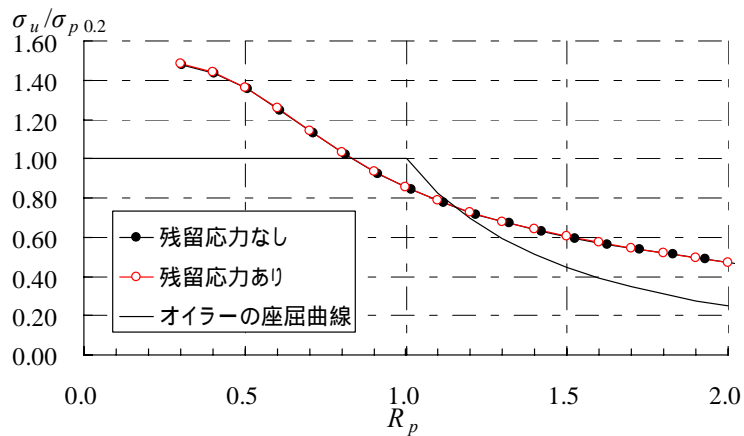
図-5.3，5.4，5.5，5.6 から分るように，端部接合板，中央接合板，2ヶ所接合板ともに，残留応力が耐荷力に与える影響はほとんどない．



(a) $b=400\text{mm}$

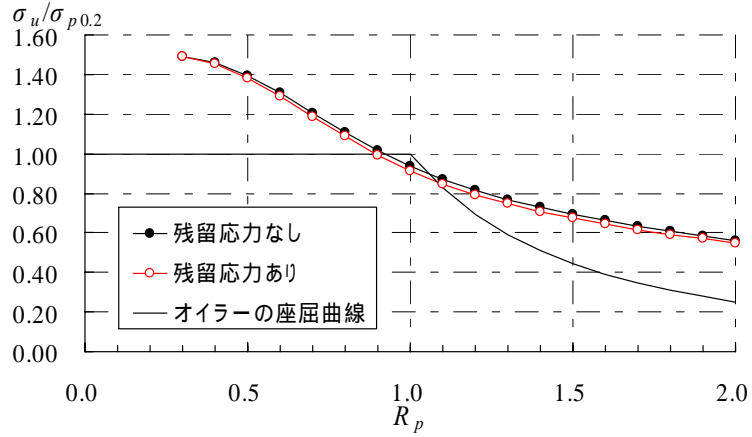


(b) $b=600\text{mm}$

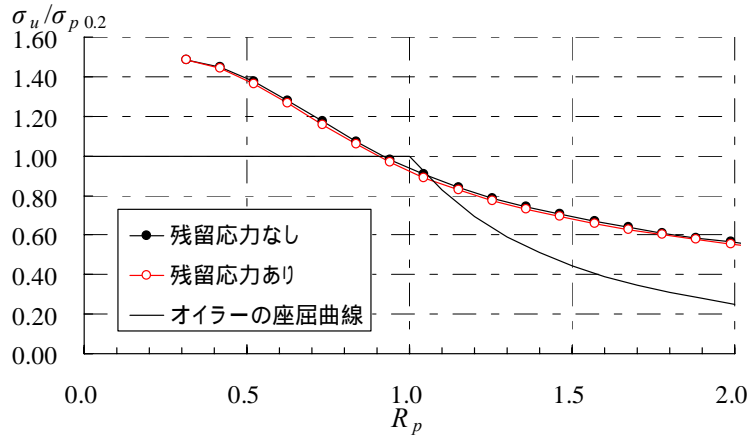


(c) $b=1200\text{mm}$

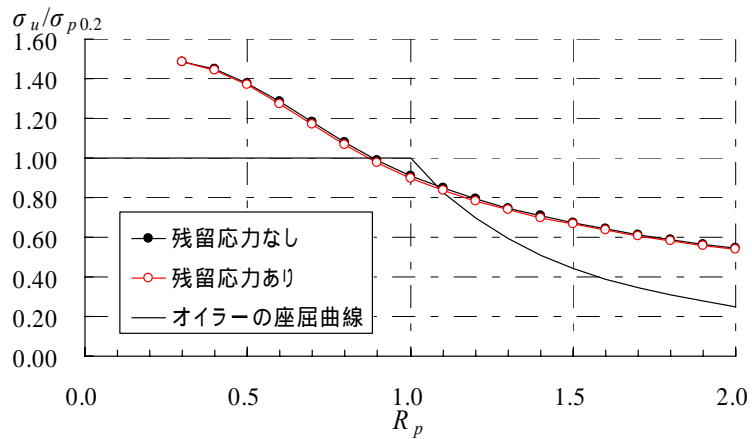
図-5.3 端部接合板 (A6061-T6)



(a) $b=400\text{mm}$

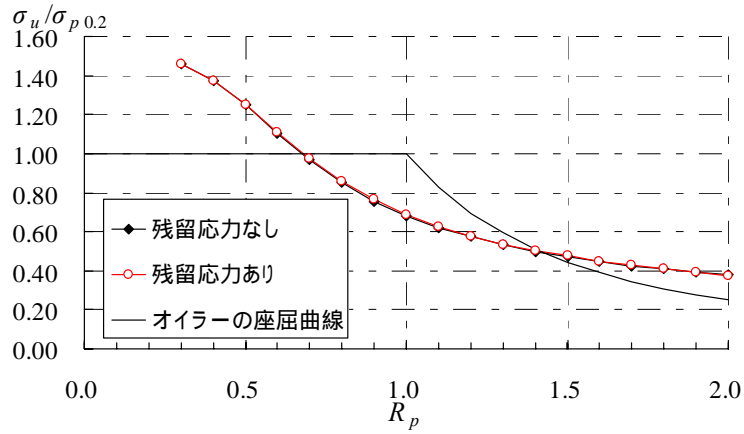


(b) $b=600\text{mm}$

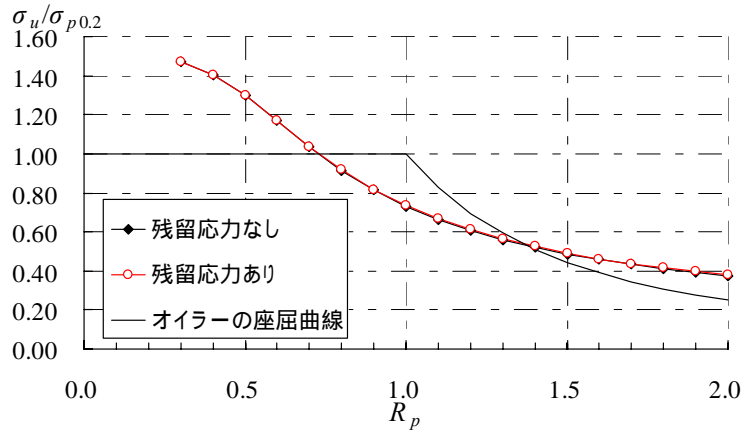


(c) $b=1200\text{mm}$

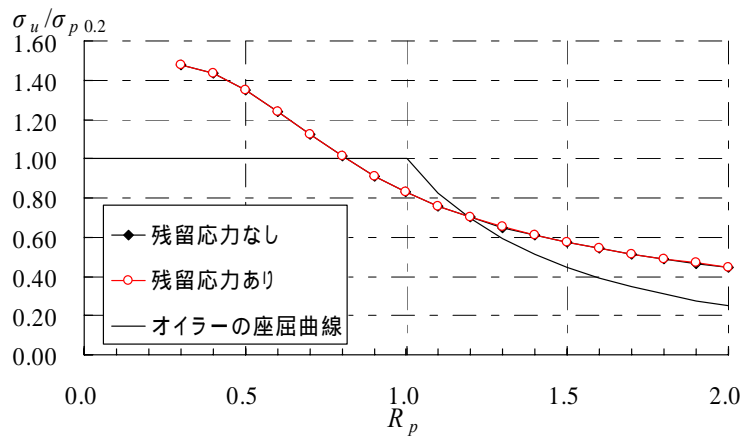
図-5.4 中央接合板 (A6061-T6)



(a) $b=400\text{mm}$

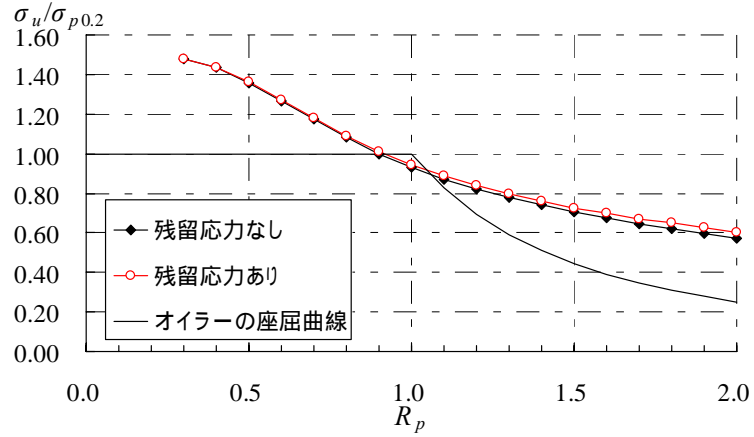


(b) $b=600\text{mm}$

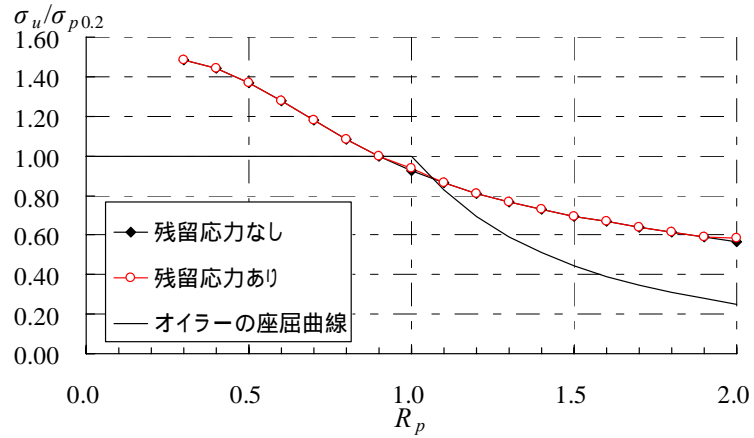


(c) $b=1200\text{mm}$

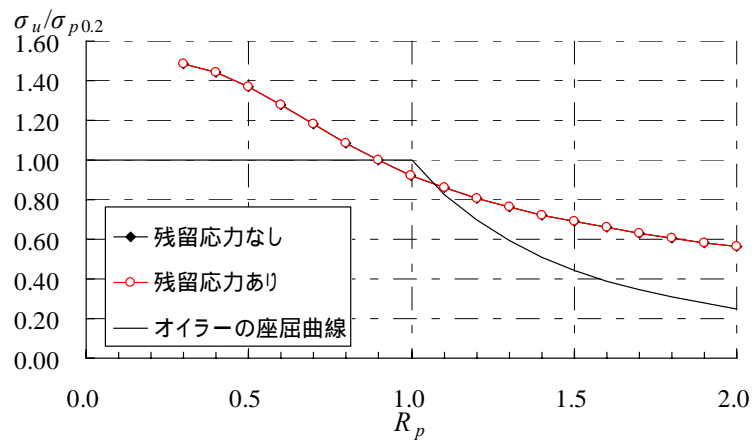
図 5.5 $c=25\text{mm}$ の 2 ヶ所接合板 (A6061-T6)



(a) $b=600\text{mm}$



(b) $b=900\text{mm}$



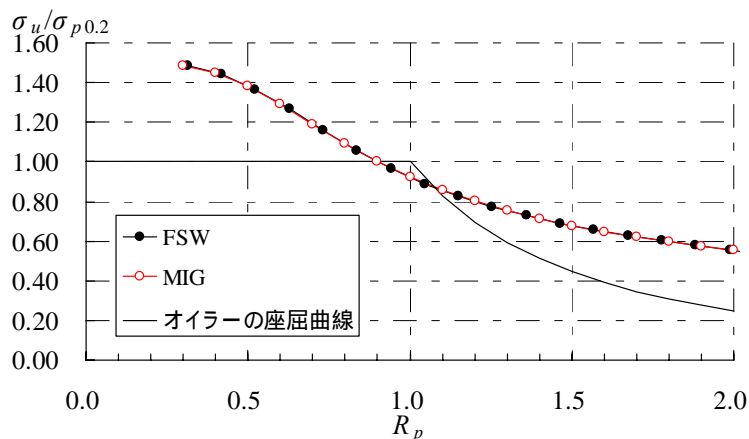
(c) $b=1200\text{mm}$

図 5.6 $c=b/6$ の 2 ヶ所接合板 (A6061-T6)

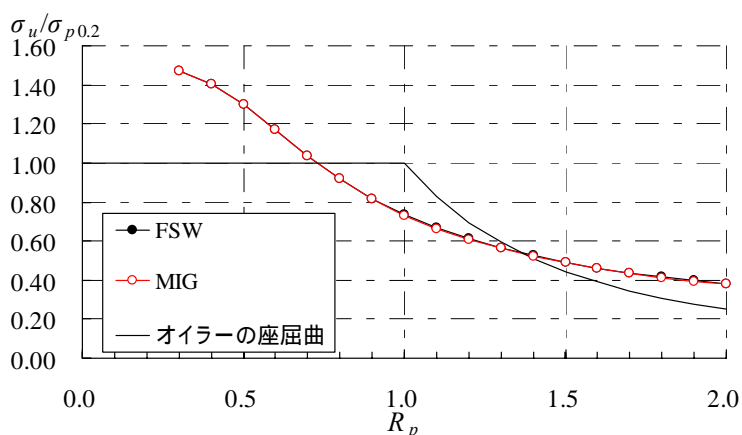
5.3 接合方法の違い

アルミニウム合金 A6061-T6 の中央接合板および $c=25\text{mm}$ の 2ヶ所接合板に対して、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-5.7 に示す。摩擦攪拌接合に対して、ひずみ硬化パラメータ n を 10 とし、MIG 溶接に対して n を 5.3 としている。板幅は 600mm である。最大初期たわみ $w_{0\text{max}}$ を $b/250$ とし、残留応力を考慮している。MIG 溶接に対する FEM 解析の数値データを付録 D に示す。

図-5.7 から分るように、中央接合板および 2ヶ所接合板ともに、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、A6061-T6 の中央接合板および 2ヶ所接合板に対して、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。



(a) 中央接合板



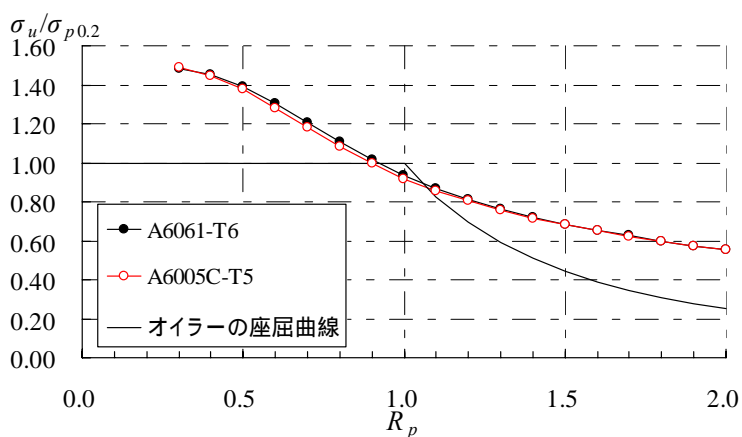
(b) $c=25\text{mm}$ の 2ヶ所接合板

図-5.7 接合方法の違い

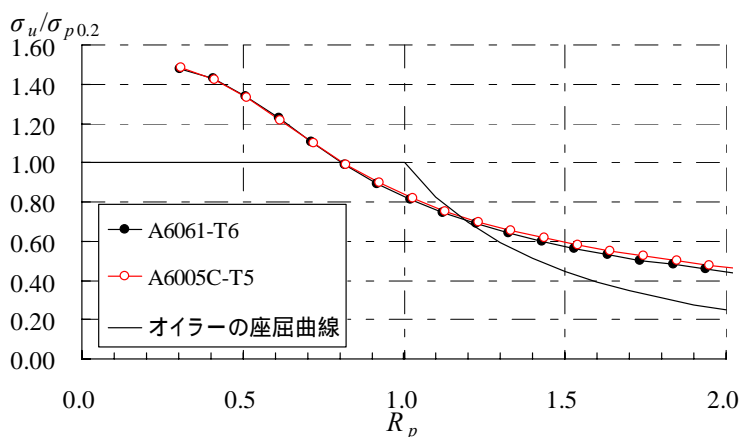
5.4 A6005C-T5 板と A6061-T6 板の耐荷力の比較

板幅が 600mm の非接合板，端部接合板，中央接合板， $c=25\text{mm}$ および $c=100\text{mm}$ ($=b/6$) の 2ヶ所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-5.8 に示す．最大初期たわみ $w_{0\text{max}}$ を $b/250$ とし，残留応力を考慮している．A6005C-T5 板に対する FEM 解析の数値データを付録 E に示す．

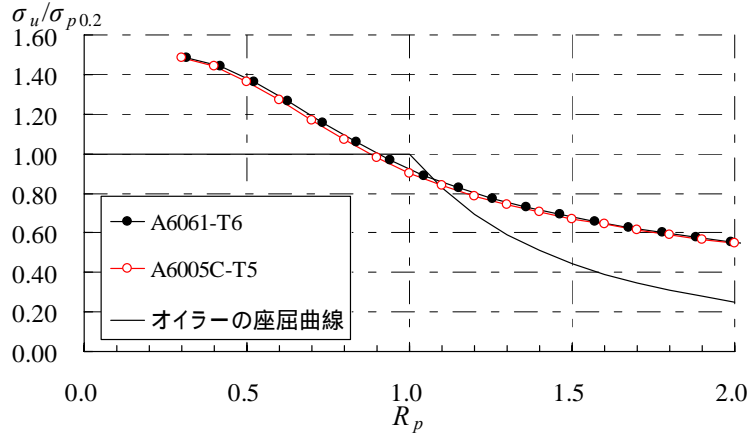
図-5.8(a)，(b)，(c)から分るように，非接合板，端部接合板および中央接合板において，A6005C-T5 板と A6061-T6 板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2} - R_p$ 関係はほぼ一致している．図-5.8(d)と(e)から分るように， $c=25\text{mm}$ および $c=100\text{mm}$ の各 2ヶ所接合板においては，A6005C-T5 板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が A6061-T6 板のそれに近い．



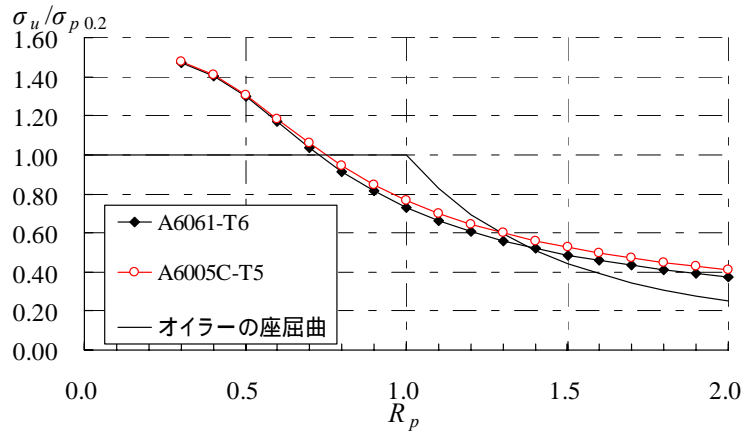
(a) 非接合板



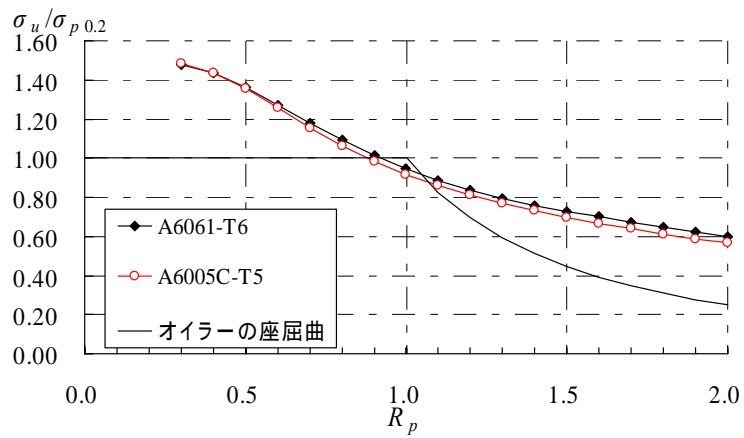
(b) 端部接合板



(c) 中央接合板



(d) $c=25\text{mm}$ の2ヶ所接合板



(e) $c=100\text{mm}$ の2ヶ所接合板

図-5.8 A6005C-T5板とA6061-T6板の耐荷力の比較

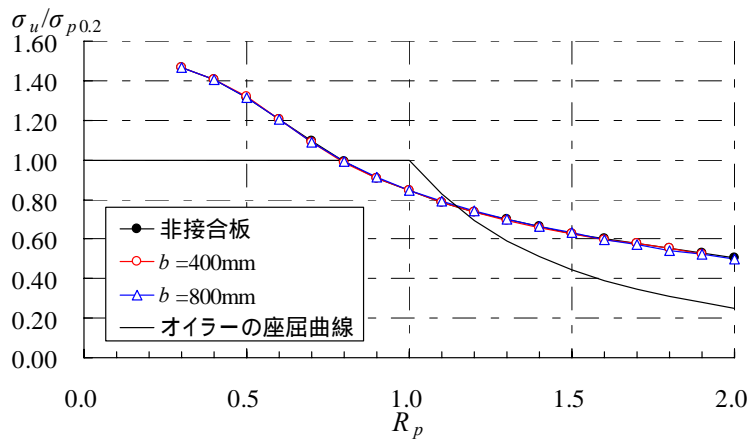
第6章 A5083-O 板の曲げ耐荷力

アルミニウム合金 A5083-O の非接合板、端部接合板、中央接合板および2ヶ所接合板に対して、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ - R_p 関係を図-6.1 に示す。最大初期たわみ w_{0max} を $b/250$ とし、残留応力を考慮している。FEM 解析の数値データを付録 F に示す。同付録に示すように、2ヶ所接合板においては、一部、縦横比 a/b が 0.4 または 0.3 に対して FEM 解析を行なっている。これは、5.2 節で述べた理由と同じ理由による。

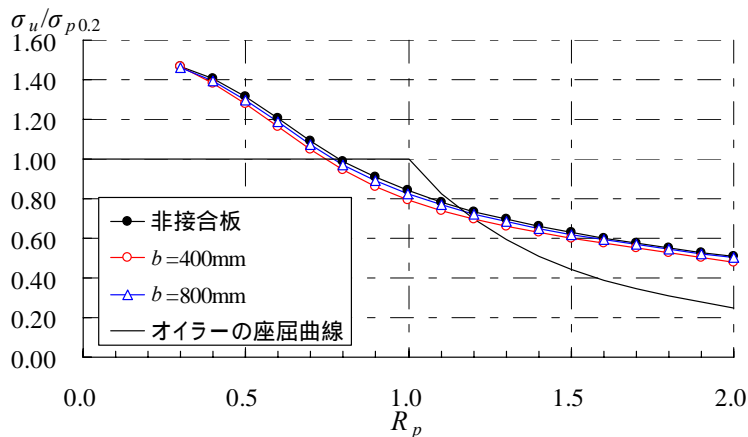
図-6.1(a) から分るように、端部接合板では残留応力の影響はない。

図-6.1(b) から分るように、中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は、残留応力の影響より、非接合板のそれよりわずかに低下する。板幅 400mm に対する $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は板幅 800mm に対するそれより低い。これは、板幅が小さくなるほど圧縮残留応力の値が増加するためと考えられる。

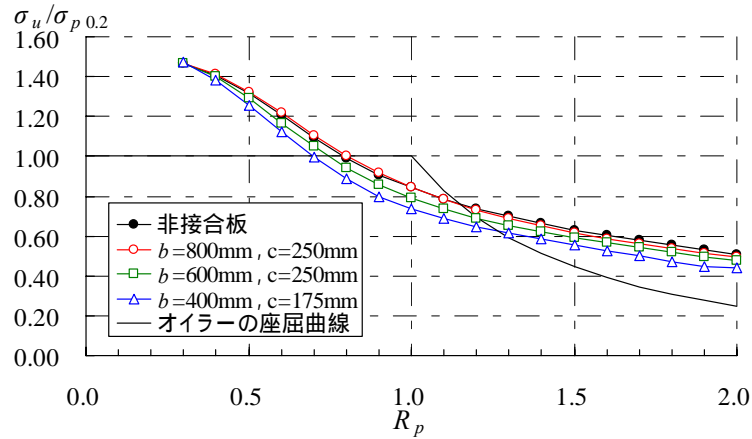
図-6.1(c) から分るように、2ヶ所接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は、板幅が小さくなるほど低下する。



(a) 端部接合板



(b) 中央接合板



(c) 2ヶ所接合板

図-6.1 A5083-O 板の耐荷力

板幅が 400mm の 2ヶ所接合板に対して、接合位置が耐荷力に与える影響を図-6.2 に示す。最大初期たわみ $w_{0\max}$ を $b/250$ とし、残留応力を考慮している。FEM 解析の数値データを付録 F に示す。図-6.2 から分るように、 c が大きくなると $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が低下する。これは、 c が大きくなるに従って、面内曲げによる圧縮応力を相殺する引張残留応力が長方形板の中央に移っていくためと考えられる。

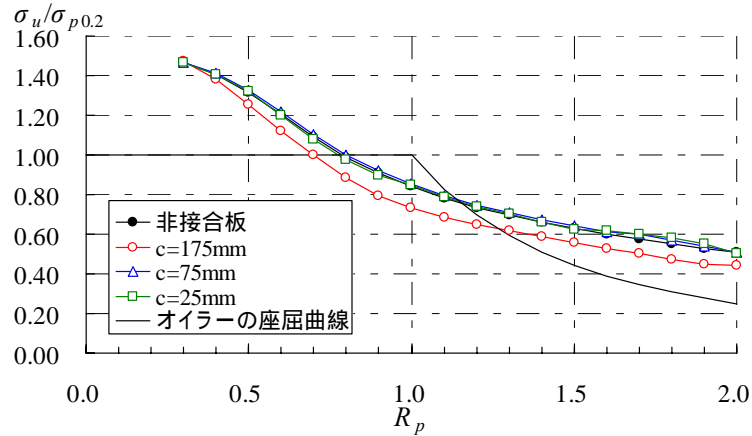


図-6.2 接合位置が耐荷力に与える影響(A5083-O)

第 7 章 耐荷力曲線

図-5.1~5.8, 6.1, 6.2 から分るように, 面内曲げを受ける両縁支持板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2} - R_p$ 関係は, R_p が小さい範囲では $\sigma_u/\sigma_{p0.2} = 1.5$ に漸近し, $0.8 < \sigma_u/\sigma_{p0.2} < 1.5$ の間で直線, $\sigma_u/\sigma_{p0.2} < 0.8$ で少し下向きの曲線になる. そこで面内曲げを受ける両縁支持板の耐荷力を表す曲線として次式を採用する.

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{p0.2}} = \begin{cases} 1.5 & (R_p \leq R_{cr}) \\ 1.5 - 0.7 \frac{R_p - R_{cr}}{R_{0.8} - R_{cr}} & (R_{cr} \leq R_p \leq R_{0.8}) \\ 0.8 \left(\frac{R_{0.8}}{R_p} \right)^m & (R_{0.8} \leq R_p) \end{cases} \quad (7.1)$$

ここに, R_{cr} : 耐荷力曲線が $\sigma_u/\sigma_{p0.2} = 1.5$ 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

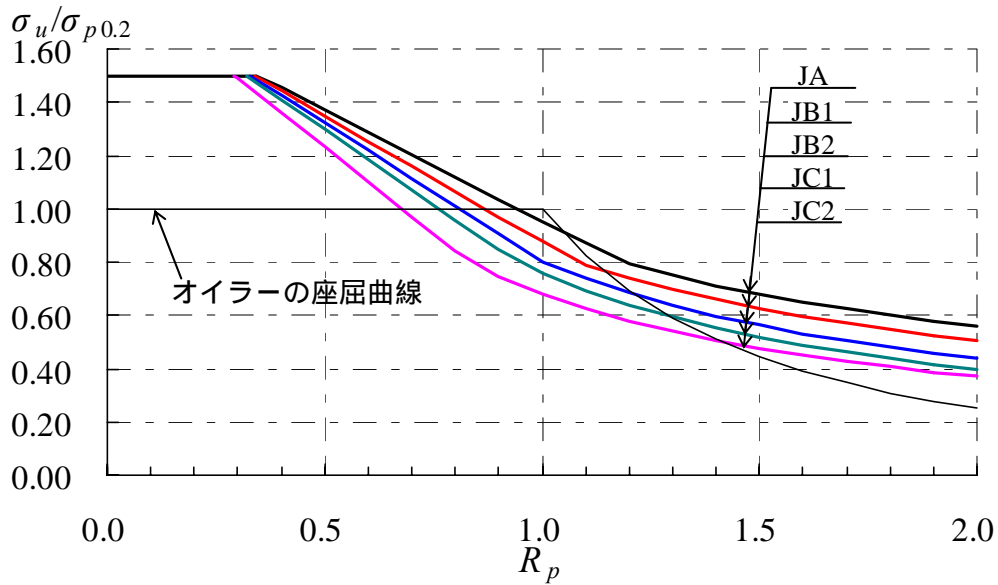
$0.8 < \sigma_u/\sigma_{p0.2} < 1.5$ の FEM 解析値に直線を仮定し, これに最小 2 乗法を適用して得られる式を式(7.1)の中段の式の形式に変形して, R_{cr} および $R_{0.8}$ の値を求める. $\sigma_u/\sigma_{p0.2} < 0.8$ の FEM 解析値に対して, 式(7.1)の下段の式を仮定し, これに最小 2 乗法を適用して m の値を求める. $R_{cr}, R_{0.8}, m$ の値を表-7.1 に示す. 式(7.1)が $\sigma_u/\sigma_{p0.2} = 1.0$ と交差する幅厚比パラメータ $R_{1.0}$ の値も同表に示す. 表-7.1 の $R_{cr}, R_{0.8}, m$ の値が用いられた式(7.1)が与える耐荷力曲線と FEM 解析値との比較を付録 G に示す. 式(7.1)が与える耐荷力曲線は FEM 解析値にほぼ一致している. 式(7.1)が与える耐荷力曲線を図-7.1 に示す. 表-7.1 の耐荷力曲線の区分について次に述べる.

表-7.1 耐荷力曲線の区分

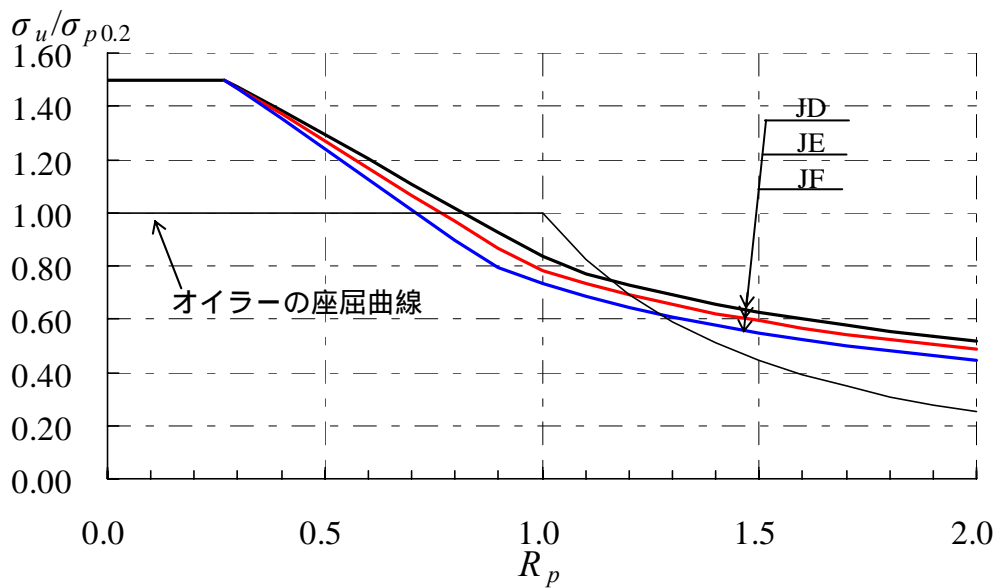
アルミニウム合金		A6061-T6 A6005C-T6	A5083-O					
				R_{cr}	$R_{0.8}$	m	$R_{1.0}$	
非接合板		JA	JD	JA	1.18	0.69	0.94	
端部接合板	$1200 \leq b$	JB1		JB1	0.34	1.08	0.75	0.87
	$600 \leq b < 1200$	JB2		JB2	0.32	1.00	0.87	0.81
	$400 \leq b < 600$	JC1		JC1	0.32	0.94	0.92	0.76
中央接合板	$400 \leq b$	JA		JC2	0.29	0.83	0.88	0.68
2ヶ所接合板	$800 \leq b$	$c \geq b/6$	JA	JD	0.27	1.04	0.67	0.82
		$25 \leq c < b/6$	JC1	JE	0.27	0.96	0.68	0.77
	$600 \leq b < 800$	$c \geq b/6$	JA	JF	0.27	0.89	0.72	0.71
		$25 \leq c < b/6$	JC2					
	$400 \leq b < 600$	$c \geq b/5$	JA					
		$25 \leq c < b/5$	JC2					

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-7.1 耐荷力曲線

A6061-T6 の非接合板の耐荷力曲線には，図-5.1 の各図に与えられている非接合板の FEM 解析値を適用する．

A6061-T6 の端部接合板においては，5.2 節で述べたように，残留応力の影響がないので，これを考慮しない．図-5.1(a)に示すように，端部接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は，非接合板のそれより低く，板幅によって異なる．したがって，板幅を $400 \leq b < 600$ ， $600 \leq b < 1200$ ， $1200 \leq b$ の三つに区分し， ， ， に対して，それぞれ図-5.1(a)の $b = 400\text{mm}$ ， 600mm ， 1200mm の FEM 解析値を耐荷力曲線に適用する．

A6061-T6 の中央接合板においては、5.2 節で述べたように、残留応力の影響がほとんどないので、これを考慮しない。図-5.1(b)に示すように、残留応力を考慮しない場合の中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は非接合板のそれにほぼ等しい。したがって、A6061-T6 の中央接合板の耐荷力曲線として、非接合板の耐荷力曲線と同じ区分にする。

A6061-T6 の 2 ヶ所接合板においては、図-5.1(c),(d),(e)および図-5.2 に示すように、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は接合位置と板幅によって異なる。5.2 節で述べたように、残留応力の影響はほぼないので、これを考慮しない。したがって、板幅を $b \geq 800$ 、 $600 \leq b < 800$ 、 $400 \leq b < 600$ の三つに区分する。図-5.1(e)において、 b が 600mm 以上の 2 ヶ所接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は非接合板のそれにほぼ等しいので、 $c \geq b/6$ に対する耐荷力曲線を非接合板の耐荷力曲線と同じ区分にする。図-5.2(a)において、 $b = 400$ mm の 2 ヶ所接合板の $c = 75$ mm に対する $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は非接合板のそれにほぼ等しく、 $c/b = 400/75 = 5.33$ であるので、図-5.2(a)に示すように、 $c \geq b/5$ に対する耐荷力曲線を非接合板の耐荷力曲線と同じ区分にする。図-5.1(c)の $b = 800$ mm の 2 ヶ所接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は、図-5.1(a)の $b = 400$ mm の端部接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ にほぼ等しくなるので、 $25 \leq c < b/6$ に対する耐荷力曲線を端部接合板の $400 \leq b < 600$ に対する耐荷力曲線と同じ区分にする。 $25 \leq c < b/6$ および $25 \leq c < b/5$ に対して、図-5.1(c)の $b = 400$ mm の 2 ヶ所接合板の FEM 解析値を耐荷力曲線に適用する。

5.4 節で述べたように、A6005C-T5 の非接合板、端部接合板、中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は A6061-T6 板のそれらにほぼ一致し、2 ヶ所接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は A6061-T6 板のそれに近い。したがって、A6005C-T5 板の耐荷力曲線は A6061-T6 板の耐荷力曲線と同じ区分にする。

A5083-O の端部接合板においては、図-6.1(a)に示すように、残留応力の影響がなく、非接合板の耐荷力曲線とほぼ一致する。したがって、A5083-O の端部接合板の耐荷力曲線には、図-6.1(a)の非接合板の FEM 解析値を適用する。

A5083-O の中央接合板においては、図-6.1(b)に示すように、残留応力の影響により、中央接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が非接合板のそれより幾分低い。したがって、A5083-O の中央接合板の耐荷力曲線には、図-6.1(b)の $b = 400$ mm の FEM 解析値を適用する。

A5083-O の 2 ヶ所接合板においては、図-6.2 に示すように、 $b = 400$ mm の板幅で $c = 175$ mm に対する耐荷力が最も低下する。したがって、A5083-O の 2 ヶ所接合板の耐荷力曲線には、図-6.2 の $c = 175$ mm に対する FEM 解析値を適用する。

JAA 指針⁵⁾の面内曲げ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 1.0 に固定されており、この幅厚比の値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-7.1 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、幅厚比パラメータ $R_{1.0}$ の値は 0.68 から 0.94 であり、A5083-O に対して $R_{1.0}$ の値は 0.71 から 0.82 である。これらの値は JAA 指針の規定値 1.0 よりかなり低いので、JAA 指針の規定値 1.0 は見直す必要がある。

8. 結論

本研究では、接合位置を考慮して、面内曲げ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。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、 $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ が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ほぼ等しくなる。
- (3) A6061-T6 の端部接合板、中央接合板、2ヶ所接合板において、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 の非接合板、端部接合板、中央接合板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ は A6061-T6 板のそれにほぼ等しい。A6005C-T5 の 2ヶ所接合板の $\sigma_u / \sigma_{p0.2}$ は A6061-T6 板のそれに近い。
- (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、A6061-T6 と A6005C-T5 に対して 0.68 から 0.94 であり、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⁵⁾の規定値は見直しが必要である。
- (8) 本研究の成果に基づいて、耐荷力曲線を次の形式で与えた。

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

ここに、 R_{cr} : 耐荷力曲線が $\sigma_u / \sigma_{p0.2} = 1.5$ 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

耐荷力曲線の区分および R_{cr} , $R_{0.8}$, m , $R_{0.1}$ の値を次表に示す。

アルミニウム合金		A6061-T6 A6005C-T6	A5083-O	R_{cr}	$R_{0.8}$	m	$R_{1.0}$		
非接合板		JA	JD	JA	0.34	1.18	0.69	0.94	
端部接合板	$1200 \leq b$	JB1		JB1	0.34	1.08	0.75	0.87	
	$600 \leq b < 1200$	JB2		JB2	0.32	1.00	0.87	0.81	
	$400 \leq b < 600$	JC1		JC1	0.32	0.94	0.92	0.76	
中央接合板	$400 \leq b$	JA		JC2	0.29	0.83	0.88	0.68	
2ヶ所接合板	$800 \leq b$	$c \geq b/6$	JA	JD	0.27	1.04	0.67	0.82	
		$25 \leq c < b/6$	JC1	JE	0.27	0.96	0.68	0.77	
	$600 \leq b < 800$	$c \geq b/6$	JA	JF	JF	0.27	0.89	0.72	0.71
		$25 \leq c < b/6$	JC2						
	$400 \leq b < 600$	$c \geq b/5$	JA						
		$25 \leq c < b/5$	JC2						

b : 板幅 (単位 : mm)

c : 接合位置 (単位 : mm)

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, No.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, 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.
- 4) 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.
- 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) 日本マーク: MARC, K6, 2005.

付録 A 全塑性モーメントの誘導

図-A.1を参照して，非接合板，端部接合板，中央接合板および2ヶ所接合板の全塑性モーメント M_p が次のように与えられる．

$$\text{非接合板} \quad : \quad M_p = \left(\frac{b}{4} \times \frac{b}{2} \sigma_{0.2} \right) \times 2t = \frac{b^2 t}{4} \sigma_{0.2} \quad (\text{A.1})$$

$$\begin{aligned} \text{端部接合板} \quad : \quad M_p &= \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{b}{2} - 25 \right) \times \left(\frac{b}{2} - 25 \right) \sigma_{0.2} + \left(\frac{b}{2} - 12.5 \right) \times 25 \sigma_{j0.2} \right\} \times 2t \\ &= \frac{b^2 t}{4} \left\{ \left(1 - \frac{100}{b} + \frac{2500}{b^2} \right) \sigma_{0.2} + \left(\frac{100}{b} - \frac{25}{b^2} \right) \sigma_{j0.2} \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

$$\begin{aligned} \text{中央接合板} \quad : \quad M_p &= \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{b}{2} + 25 \right) \times \left(\frac{b}{2} - 25 \right) \sigma_{0.2} + 12.5 \times 25 \sigma_{j0.2} \right\} \times 2t \\ &= \frac{b^2 t}{4} \left\{ \left(1 - \frac{2500}{b^2} \right) \sigma_{0.2} + \frac{2500}{b^2} \sigma_{j0.2} \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{aligned} \text{2ヶ所接合板} \quad : \quad M_p &= \left\{ \frac{1}{4} (b - 2c - 50) \times \frac{1}{2} (b - 2c - 50) \sigma_{0.2} + \frac{1}{2} (b - 2c - 50) \times (c - 25) \sigma_{0.2} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{b}{2} - c \right) \times 50 \sigma_{j0.2} \right\} \times 2t \\ &= \frac{b^2 t}{4} \left\{ \left(1 - \frac{200}{b} + \frac{400c}{b^2} \right) \sigma_{0.2} + \left(\frac{200}{b} - \frac{400c}{b^2} \right) \sigma_{j0.2} \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

ここに， $\sigma_{0.2}$: 母材の0.2%耐力

$\sigma_{j0.2}$: 接合部の0.2%耐力

b : 板幅 (単位: mm)

c : 長方形板の各縁から接合中心までの距離 (単位: mm)

t : 長方形板の板厚 (単位: mm)

$\sigma_{p0.2}$ は次式で定義される．

$$\sigma_{p0.2} = \frac{M_p}{Z} \quad (\text{A.5})$$

$$\text{ここに，} Z = \frac{b^2 t}{4} : \text{長方形板の塑性断面係数} \quad (\text{A.6})$$

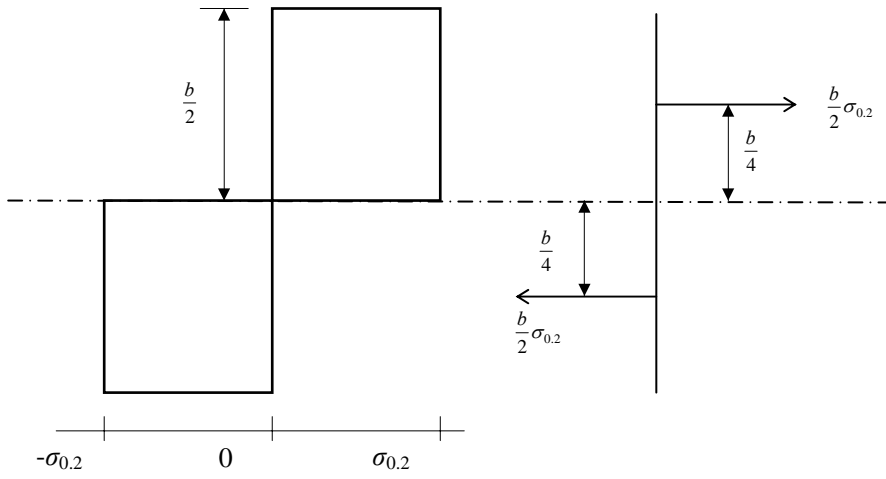
したがって， $\sigma_{p0.2}$ は次のように与えられる．

$$\text{非接合板} \quad : \quad \sigma_{p0.2} = \sigma_{0.2} \quad (\text{A.7})$$

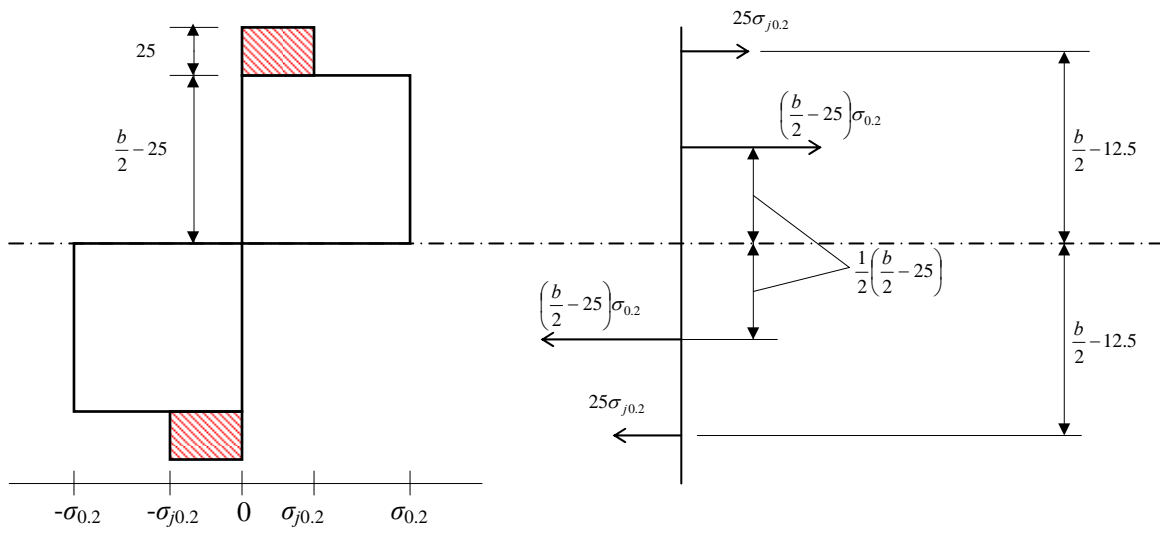
$$\text{端部接合板} \quad : \quad \sigma_{p0.2} = \left(1 - \frac{100}{b} + \frac{2500}{b^2} \right) \sigma_{0.2} + \left(\frac{100}{b} - \frac{25}{b^2} \right) \sigma_{j0.2} \quad (\text{A.8})$$

$$\text{中央接合板} \quad : \quad \sigma_{p0.2} = \left(1 - \frac{2500}{b^2} \right) \sigma_{0.2} + \frac{2500}{b^2} \sigma_{j0.2} \quad (\text{A.9})$$

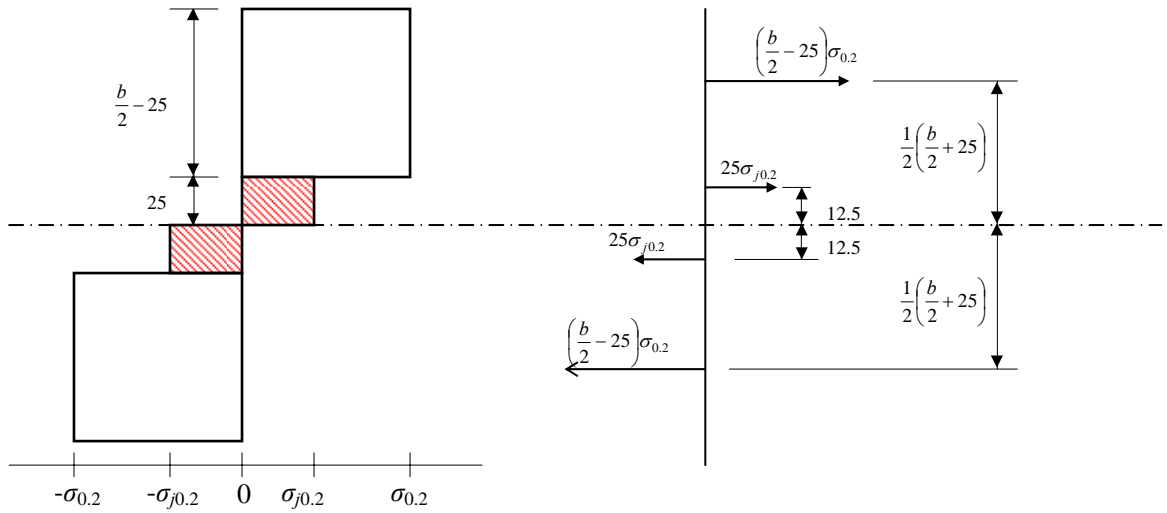
$$\text{2ヶ所接合板} \quad : \quad \sigma_{p0.2} = \left(1 - \frac{200}{b} + \frac{400c}{b^2} \right) \sigma_{0.2} + \left(\frac{200}{b} - \frac{400c}{b^2} \right) \sigma_{j0.2} \quad (\text{A.10})$$



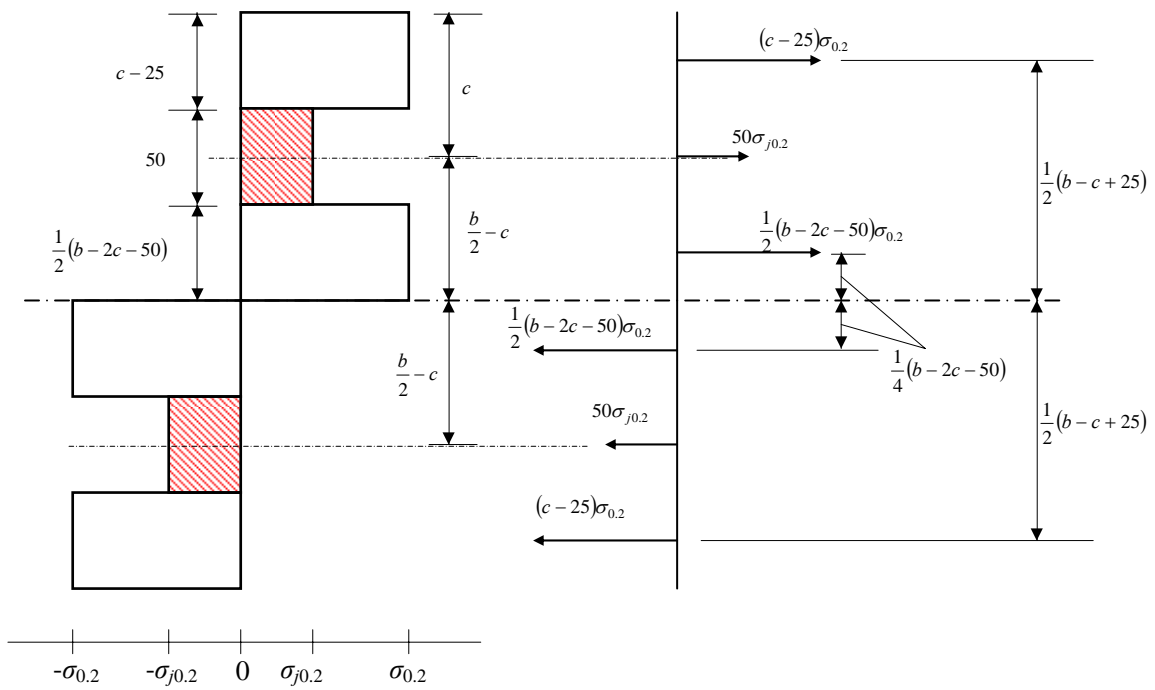
(a) 非接合板



(b) 端部接合板



(c) 中央接合板



(d) 2ヶ所接合板

図-A.1 全塑性モーメント

付録B 図-5.1 と 5.2 の FEM 解析の数値データ

σ_u (MPa)

R_p	非接合板	端部接合板			中央接合板		
		b (mm)			b (mm)		
		400	600	1200	400	600	1200
0.30	363.9	313.9	330.4	346.3	361.6	363.1	363.5
0.40	355.8	302.6	319.9	337.6	354.1	355.2	355.4
0.50	340.5	282.0	301.3	320.4	338.9	339.8	339.8
0.60	319.3	256.4	277.1	297.9	317.8	318.4	318.8
0.70	295.7	229.7	250.7	272.5	293.3	294.2	294.4
0.80	271.4	204.4	225.6	247.8	269.5	270.1	270.5
0.90	248.9	182.6	203.5	225.5	246.8	247.8	247.9
1.00	228.5	164.9	184.7	206.3	227.9	228.4	228.7
1.10	212.4	149.4	169.3	190.4	211.9	212.4	212.7
1.20	198.6	137.7	156.0	176.9	197.8	198.6	199.0
1.30	186.6	126.9	145.4	165.4	186.6	186.8	187.0
1.40	176.5	118.2	136.0	155.7	176.6	176.8	177.4
1.50	167.9	110.4	127.8	147.4	168.0	168.2	168.4
1.60	159.9	104.3	121.0	140.1	160.5	160.4	160.9
1.70	153.1	98.2	114.7	133.6	153.3	153.5	153.7
1.80	146.8	93.5	109.2	127.5	147.5	147.2	147.5
1.90	140.6	88.9	104.4	121.8	141.7	141.6	141.7
2.00	134.9	84.4	99.3	116.5	135.8	136.4	136.7

σ_u (MPa)

R_p	2ヶ所接合板												
	b (mm)												
	400				600				800	900	1200		
	c (mm)				c (mm)				c (mm)	c (mm)	c (mm)		
	25	50	75	175	25	75	100	250	25	150	25	200	
0.30	270.0	284.4	298.7	352.2	298.6	311.1	317.4	352.8	313.6	332.9	330.1	340.6	
0.40	254.6	272.9	290.1	347.0	285.8	300.5	308.0	347.2	302.4	323.8	319.6	331.6	
0.50	231.1	253.6	275.1	333.1	264.0	282.2	291.5	333.8	282.4	307.9	301.0	315.4	
0.60	204.5	232.0	258.0	313.0	237.4	260.4	271.8	313.2	256.7	287.1	276.9	294.4	
0.70	178.8	211.6	240.7	289.2	210.3	237.8	251.5	289.4	230.0	265.0	250.6	271.7	
0.80	157.2	193.3	223.7	264.9	185.7	217.0	232.0	265.4	205.0	243.9	225.5	249.8	
0.90	140.0	177.7	208.0	243.4	165.1	199.3	214.6	243.2	183.1	224.8	203.5	229.7	
1.00	126.2	164.8	194.5	224.4	147.7	184.1	199.5	224.7	164.8	208.0	184.7	212.0	
1.10	114.8	153.6	182.1	209.1	134.0	171.9	186.7	208.5	150.0	193.8	169.0	197.5	
1.20	106.1	145.0	172.0	195.8	122.9	161.5	175.9	195.1	137.6	182.2	156.1	185.3	
1.30	98.4	137.8	163.6	184.5	113.3	153.2	166.7	183.8	127.2	172.4	145.1	175.0	
1.40	92.4	131.5	155.3	174.4	105.5	146.0	158.8	174.2	118.4	164.0	135.8	166.4	
1.50	87.3	126.5	148.3	165.7	98.9	139.5	151.1	165.5	110.9	156.3	127.8	158.6	
1.60	83.1	121.5	142.2	158.9	93.1	134.1	145.0	158.2	104.2	149.8	120.8	151.9	
1.70	78.8	116.8	136.5	151.6	87.9	128.9	138.7	151.0	98.5	143.3	114.5	145.4	
1.80	75.7	112.4	131.5	145.8	83.5	124.1	133.3	145.0	93.4	138.0	109.2	139.6	
1.90	72.7	108.7	126.4	139.8	79.8	119.5	128.1	139.0	89.2	132.2	104.1	134.2	
2.00	69.8	105.0	122.3	134.7	76.4	115.1	123.2	133.3	85.2	127.6	99.5	129.0	

付録C 図-5.3, 5.4, 5.5, 5.6 の FEM 解析の数値データ

σ_u (MPa)

R_p	端部接合板			中央接合板			2ヶ所接合板					
	b (mm)			b (mm)			$c=25\text{mm}$			$c=b/6$		
	b (mm)			b (mm)			b (mm)			b (mm)		
	400	600	1200	400	600	1200	400	600	1200	600	900	1200
0.30	314.2	330.4	346.3	361.8	363.1	363.5	269.9	298.6	329.6	317.3	332.9	340.6
0.40	302.5	319.9	337.6	352.7	354.2	354.6	254.7	285.6	319.6	308.1	323.7	331.6
0.50	282.0	301.3	320.4	335.9	337.6	338.2	231.7	264.1	301.0	291.9	307.6	315.4
0.60	256.6	277.2	297.9	313.4	315.4	316.5	205.9	237.8	276.8	272.9	287.1	294.4
0.70	229.9	250.8	272.5	288.2	290.8	291.8	180.5	210.9	250.6	253.0	265.0	271.7
0.80	204.8	225.8	247.8	264.0	266.4	267.8	158.6	186.5	225.6	234.2	243.9	249.8
0.90	183.1	203.7	225.5	241.0	244.0	245.2	141.3	166.1	203.5	217.2	224.8	229.7
1.00	165.5	185.1	206.3	222.0	224.6	225.9	127.2	148.9	184.7	202.5	210.1	212.0
1.10	150.2	169.8	190.4	205.9	208.7	210.0	115.2	135.3	169.0	189.9	193.8	197.5
1.20	138.6	156.6	176.9	192.0	195.0	196.5	106.5	124.3	156.2	179.5	182.2	185.3
1.30	128.0	146.2	165.4	181.1	183.5	184.6	98.6	114.8	145.2	170.5	172.4	175.0
1.40	119.4	137.0	155.7	171.5	173.7	175.2	92.8	106.9	135.9	162.9	164.0	166.4
1.50	111.6	128.9	147.4	163.4	165.5	166.4	88.0	100.1	128.0	155.7	156.3	158.6
1.60	105.6	122.0	140.1	156.3	158.0	159.1	83.1	94.0	120.9	150.1	149.8	151.9
1.70	99.4	115.7	133.6	149.5	151.3	152.2	79.3*	89.0	114.7	144.2	143.3	145.4
1.80	94.6	110.2	127.5	144.0	145.2	146.2	75.8*	84.2	109.3	139.1	138.0	139.6
1.90	89.8	105.1	121.8	138.4	139.8	140.4	72.5*	80.9	104.3	134.0	132.2	134.2
2.00	85.0	99.7	116.5	132.7	134.7	135.6	69.4*	77.0	99.8	129.0	131.3	129.0

* : $a/b = 0.4$ で計算

付録D 図-5.7 の FEM 解析の数値データ

σ_u (MPa)

R_p	中央接合板	2ヶ所接合板
0.30	363.1	298.8
0.40	354.2	285.7
0.50	337.7	264.0
0.60	315.6	237.6
0.70	291.0	210.7
0.80	266.6	186.2
0.90	244.3	165.8
1.00	224.9	148.4
1.10	209.0	134.7
1.20	195.3	123.7
1.30	183.8	114.1
1.40	174.0	106.2
1.50	165.7	99.2
1.60	158.1	93.0
1.70	151.5	88.2
1.80	145.4	83.4
1.90	140.0	80.2
2.00	134.9	76.7

$b=600\text{mm}$

付録 E 図-5.8 の FEM 解析の数値データ

σ_u (MPa)

R_p	非接合板	端部接合板	中央接合板	2ヶ所接合板	
				$c=25\text{mm}$	$c=100\text{mm}$
0.30	260.5	241.0	258.6	223.5	234.7
0.40	253.3	231.4	251.6	213.5	226.4
0.50	240.7	216.1	238.2	198.0	213.7
0.60	224.2	197.6	221.3	179.4	198.6
0.70	206.6	178.7	203.4	160.5	182.6
0.80	189.5	161.0	186.3	143.2	168.0
0.90	174.0	145.9	170.7	128.3	155.5
1.00	160.7	133.4	157.4	116.6	144.7
1.10	149.7	122.5	146.7	106.7	135.5
1.20	140.7	113.7	137.4	98.2	127.9
1.30	132.3	106.6	129.6	91.5	121.4
1.40	125.1	100.0	122.7	85.6	115.3
1.50	119.4	94.4	117.2	80.2	110.2
1.60	113.9	89.6	112.0	75.6	105.2
1.70	109.0	85.5	107.2	71.6	101.0
1.80	104.6	81.5	103.0	68.3	96.7
1.90	100.2	77.7	99.0	64.8	92.8
2.00	96.7	74.2	95.4	61.8	89.3

$b=600\text{mm}$

付録F 図-6.1 と 6.2 の FEM 解析の数値データ

σ_u (MPa)

R_p	非接合板	端部接合板		中央接合板		2ヶ所接合板				
		b (mm)		b (mm)		b (mm)				
		400	800	400	800	400			600	800
						c (mm)			c (mm)	c (mm)
25	75	175	250	250						
0.30	186.4	186.3	186.3	185.9	185.9	186.3	186.6	186.8	186.5	186.6
0.40	178.5	178.5	178.6	175.7	177.1	178.7	179.4	175.7	177.5	179.2
0.50	167.1	167.3	167.2	162.6	165.0	167.6	168.6	159.6	163.7	168.3
0.60	153.2	153.1	153.3	147.5	150.6	152.4	154.9	142.4	148.0	154.5
0.70	138.8	138.3	138.4	132.9	135.9	137.2	140.3	126.7	133.4	140.1
0.80	125.8	125.4	125.8	119.8	123.2	124.0	127.3	112.4	120.0	127.2
0.90	115.3	115.2	115.7	109.2	112.9	113.9	116.9	101.1	109.1	116.5
1.00	107.1	107.2	107.1	101.1	104.3	107.5	108.6	93.5	100.4	107.2
1.10	99.6	99.8	100.3	94.0	97.6	100.2	100.8	87.2	93.4	99.7
1.20	93.5	93.6	94.2	88.3	91.7	94.3	94.8	82.2	87.6	93.0
1.30	88.6	88.5	89.0	83.9	86.8	89.6*	90.0	78.2	82.9	87.4
1.40	84.2	83.6	84.4	79.9	82.6	84.1*	85.8	74.6	79.0	82.6
1.50	79.9	79.3	80.1	76.1	78.8	79.5*	81.6''	70.7	75.5	78.3
1.60	76.5	75.7	76.1	72.9	75.3	78.8''	78.0''	66.9	72.1	74.4
1.70	73.5	73.3	72.4	70.0	72.1	76.1''	76.0''	63.5	68.7	71.1
1.80	70.4	69.9	69.1	66.9	69.1	73.7	72.4''	60.0	65.7	68.1
1.90	67.3	66.8	66.2	63.9	66.4	70.3	68.5''	57.1	62.9	65.4
2.00	64.4	67.4	63.5	61.1	63.8	64.1	64.8''	56.3	60.5	63.0

* : $a/b = 0.4$ で計算

'' : $a/b = 0.3$ で計算

付録 G 耐荷力曲線と FEM 解析値との比較

