

圧縮を受けるアルミニウム合金自由突出板の耐荷力

ALST 研究レポート 34

2014 年 1 月

大阪大学大学院工学研究科

西森文子, 大倉一郎

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する。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、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ている。解析データに基づいて、圧縮を受ける自由突出板の耐荷力曲線を提案する。

目次

| | | |
|------------------------------------|-------|----|
| 第 1 章 序論 | ・ ・ ・ | 1 |
| 第 2 章 製作方法 | ・ ・ ・ | 3 |
| 第 3 章 FEM による弾塑性有限変位解析 | ・ ・ ・ | 5 |
| 3.1 応力-ひずみ関係 | ・ ・ ・ | 5 |
| 3.2 初期たわみ | ・ ・ ・ | 6 |
| 3.3 残留応力 | ・ ・ ・ | 6 |
| 3.4 境界条件と要素分割 | ・ ・ ・ | 7 |
| 第 4 章 耐荷力表示で使用するパラメータ | ・ ・ ・ | 9 |
| 4.1 圧縮強度の上限値 | ・ ・ ・ | 9 |
| 4.2 幅厚比パラメータ | ・ ・ ・ | 10 |
| 第 5 章 縦横比が耐荷力に与える影響 | ・ ・ ・ | 11 |
| 第 6 章 初期たわみが耐荷力に与える影響 | ・ ・ ・ | 14 |
| 6.1 初期たわみ形状が耐荷力に与える影響 | ・ ・ ・ | 14 |
| 6.2 最大初期たわみが耐荷力に与える影響 | ・ ・ ・ | 19 |
| 第 7 章 6000 系アルミニウム合金板の耐荷力 | ・ ・ ・ | 21 |
| 7.1 端部接合板 | ・ ・ ・ | 21 |
| 7.2 中間接合板 | ・ ・ ・ | 22 |
| 7.3 増厚中間接合板 | ・ ・ ・ | 23 |
| 7.4 A6061-T6 板と A6005C-T5 板の耐荷力の比較 | ・ ・ ・ | 24 |
| 第 8 章 A5083-0 板の耐荷力 | ・ ・ ・ | 28 |
| 第 9 章 耐荷力曲線 | ・ ・ ・ | 31 |
| 9.1 耐荷力曲線の定式化 | ・ ・ ・ | 31 |
| 9.2 Eurocode 9 との比較 | ・ ・ ・ | 36 |
| 第 10 章 結論 | ・ ・ ・ | 39 |

| | | |
|---------------------------|-----|----|
| 参考文献 | ・・・ | 41 |
| 付録 A 図-5.1 と 5.2 の数値データ | ・・・ | 43 |
| 付録 B 初期たわみ形状が耐荷力に与える影響 | ・・・ | 45 |
| 付録 C 第 7 章と第 8 章の各図の数値データ | ・・・ | 47 |

第1章 序論

近年、アルミニウム歩道橋や拡幅歩行者用アルミニウム床版が建設されるようになってきた¹⁾。さらに、道路橋用アルミニウム床版が開発され^{2),3)}、その試験施工が実施されている⁴⁾。アルミニウム床版の重量は鉄筋コンクリート床版の重量の約 1/5 と軽い。この特徴を活かして、上路式鋼アーチ橋の鉄筋コンクリート床版をアルミニウム床版で取り替えることによる耐震性の向上に関する研究が行われるようになってきた⁵⁾。このような状況で、道路橋用アルミニウム床版のみならず、道路橋用の桁もアルミニウム合金で製作できるようになることが期待される。

図-1.1 に示す、従来のアルミニウム歩道橋の桁の製作方法は鋼桁のそれと同様で、アルミニウム合金 A5083-O の圧延板を MIG 溶接による隅肉溶接で連結することにより製作される。道路橋は歩道橋より規模が大きく、歩道橋よりも格段に大きな荷重を受けるので、0.2%耐力の低い A5083-O を使って道路橋を設計することは困難である。道路橋の桁の製作には 0.2%耐力の高い A6061-T6 や A6005C-T5 などの熱処理アルミニウム合金を使用しなければならない。しかし、6000 系アルミニウム合金は熱処理によって 0.2%耐力が高められているので、MIG 溶接で溶接した場合、溶接部の 0.2%耐力が低下する。したがって、図-1.1 に示す桁を、6000 系アルミニウム合金を用いて MIG 溶接で製作した場合、垂直補剛材をウェブに連結する隅肉溶接の位置で桁の強度が低下する。そこで、図-1.2 に示すような、T 型断面の押出型材を摩擦攪拌接合(FSW)^{1),6),7)}によって接合することにより、突起が水平方向に配置されたアルミニウム合金桁が提案された⁸⁾。この桁には垂直補剛材が存在せず、ウェブを横断する接合がないので、桁の一断面で強度が低下することはない。

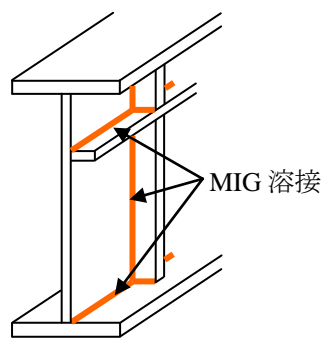


図-1.1 従来の桁

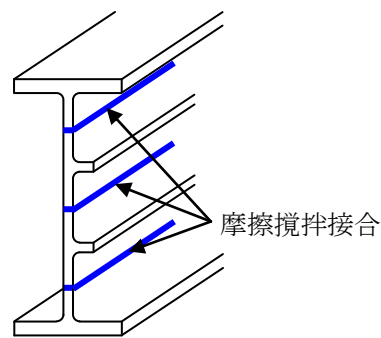


図-1.2 突起付きアルミニウム合金桁

その後、突起付きアルミニウム合金桁のウェブの断面形状を決定する方法として、座屈強度と終局強度を考慮して、面内曲げを受ける、突起付きアルミニウム合金板の断面形状を決定する方法が提案された⁹⁾。曲げを受ける I 型断面の桁の耐荷力は、フランジの横倒れ耐荷力で決まる。フランジの板厚が薄い場合には、フランジは局部座屈を起こす。そこで、圧縮を受ける自由突出板の耐荷力が調べられた¹⁰⁾。しかし、その研究においては、自由突出板の縦横比および初期たわみ形状が耐荷力に与える影響、ならびに自由突出板の内側に存在する接合部が耐荷力に与える

影響が調べられていない。

本研究は、これらを明らかにし、圧縮を受ける自由突出板の耐荷力曲線を与えることを目的とする。

第2章 製作方法

曲げを受ける I 型断面の桁のフランジの製作方法を図-2.1 に示す。図-2.1(a)は、T 型断面の押出形材を使用する場合である。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¹¹⁾。したがって、この断面のフランジの最大幅は約 250mm である。

フランジ幅が約 250mm を超える場合には、図-2.1(b), (c), (d)に示す製作方法が考えられる。図-2.1(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 型断面の桁を製作する場合である。隅肉溶接のルートからウェブとフランジの各側 25mm の範囲が強度低下を起こす^{6),12)}。

図-2.1(c)は、摩擦攪拌接合または MIG 溶接によって、T 型断面の押出形材の突出縁に平板を突合せ接合することにより、I 型断面の桁を製作する場合である。6000 系の熱処理アルミニウム合金の場合、接合中心から各側 25mm、すなわち合計 50mm の範囲が強度低下を起こす^{6),12)}。

6000 系の熱処理アルミニウム合金の場合、接合部が強度低下を起こす。そこで、図-2.1(d)は、図-2.1(c)において、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製作方法である。押出形材の製造においては、形材の端を部分的に厚くすることは容易である。接合中心から各側 25mm、すなわち合計 50mm の範囲の板厚を次式で与えられる板厚に増厚することにより、0.2%耐力に関して、接合部の断面強度は母材のそれと同じになる。

$$t_j = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{j0.2}} t \quad (2.1)$$

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

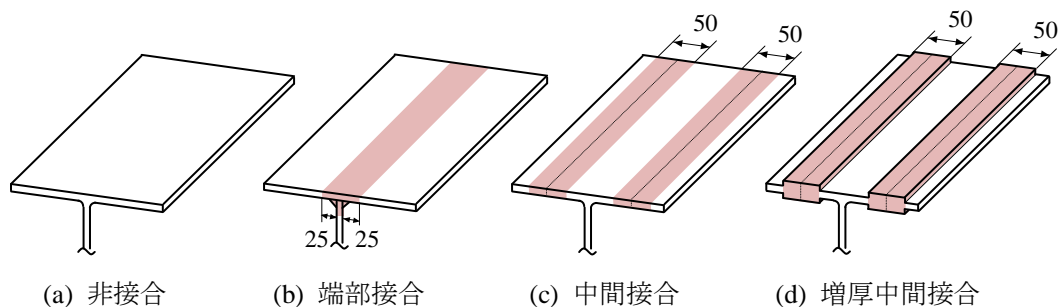


図-2.1 フランジの製作方法

本研究では、図-2.2 に示す、圧縮を受ける 4 種類の自由突出板（3 辺単純支持，1 辺自由の長方形板）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)において、ウェブの表面からの片側のフランジに対応する。

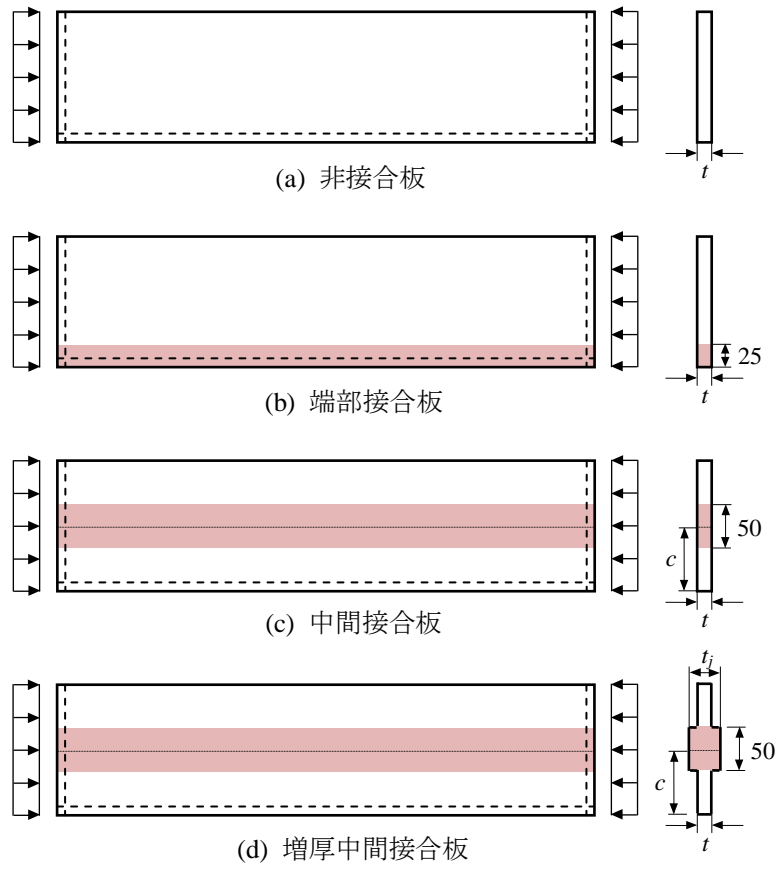


図-2.2 自由突出板

第3章 FEMによる弾塑性有限変位解析

3.1 応力-ひずみ関係

圧縮を受けるアルミニウム合金製自由突出板の耐荷力を算出するために、次式で与えられる応力-ひずみ関係を使用する¹²⁾。

$$\text{母材} \quad \begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & (\sigma \leq \sigma_{0.2}) \\ \sigma = \sigma_{0.2} & (\sigma > \sigma_{0.2}) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\text{接合部} \quad \begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} & (\sigma \leq \sigma_{j0.2}) \\ \sigma = \sigma_{j0.2} & (\sigma > \sigma_{j0.2}) \end{cases} \quad (3.2)$$

ここに、 ε と σ : ひずみと応力

E : ヤング率

$\sigma_{0.2}$ と $\sigma_{j0.2}$: 母材と接合部の0.2%耐力

n と n_j : 母材と接合部のひずみ硬化パラメータ

本研究では、熱処理アルミニウム合金 A6061-T6 と A6005C-T5、非熱処理アルミニウム合金 A5083-O を扱う。これらのアルミニウム合金の 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ と $\sigma_{j0.2}$ 、ひずみ硬化パラメータ n と n_j の値を表-3.1 に示す。母材と接合部の 0.2%耐力に対して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）¹³⁾（以後、JAA 指針と呼ぶ）で規定されている値を用いる。JAA 指針で規定されている接合部の 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する。他方、ひずみ硬化パラメータ n と n_j の値は、引張試験の結果に基づいて、非超過確率 5%に対する値である¹²⁾。式(3.1)と(3.2)においては、0.2%耐力以上のひずみ硬化を考慮していない。

表-3.1 0.2%耐力とひずみ硬化パラメータの値

| 材料 | 母材 | | 接合部 | | | |
|-----------|-------------------------|------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|
| | | | 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 |

3.2 初期たわみ

図-3.1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仮定する。

$$w_0 = w_{0\max} \frac{y}{b} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \quad (3.3)$$

- ここに、
 w_0 : 初期たわみ
 $w_{0\max}$: 最大初期たわみ
 m : 初期たわみのモード数
 a : 荷重が作用する方向の長方形板の長さ
 b : 板幅

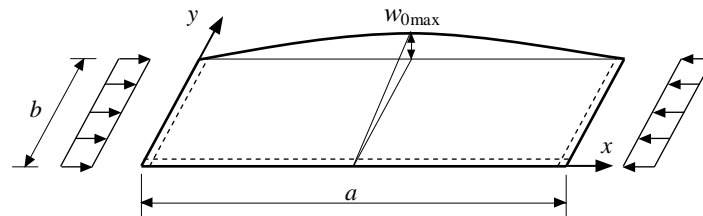


図-3.1 初期たわみ

3.3 残留応力

摩擦撈拌接合および MIG 溶接による突合せ接合によって製作された板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¹²⁾。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、A5083-O の I 型断面桁のフランジに生じる残留応力が、前述の矩形分布で表されることが示されている¹⁴⁾。これらを考慮して、接合板の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、 $y=0$ 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、そこから離れた位置に、 $25\sigma_{j0.2}/(b-25)$ の圧縮残留応力を与える (b の単位は mm)。図-3.2(b)の中間接合板の場合、 $y=c$ の位置の 50mm の幅に 0.2% 耐力 $\sigma_{j0.2}$ に等しい引張残留応力、それ以外の領域に $50\sigma_{j0.2}/(b-50)$ の圧縮残留応力を与える (b の単位は mm)。図-3.2(c)の増厚中間接合板の場合、 $y=c$ の位置の 50mm の幅に 0.2% 耐力 $\sigma_{j0.2}$ に等しい引張残留応力、それ以外の領域に $50\sigma_{j0.2}/(b-50)$ の圧縮残留応力を与える (b の単位は mm)。

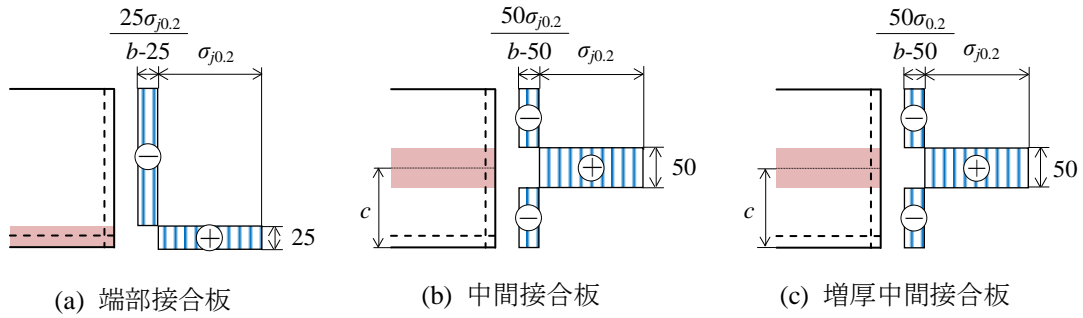


図-3.2 残留応力分布

3.4 境界条件と要素分割

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り、その境界条件を図-3.3に示す。図-3.3(a)と(b)は、それぞれ、対称条件を用いる場合と用いない場合である。6.1節で、 x 軸方向の初期たわみ形状が逆対称の場合の解析に後者の境界条件を使用し、他の場合の解析に対しては前者の境界条件を使用する。図-3.3(a)の対称条件を用いる場合、面外方向に対して、 $x=0$ と $y=0$ の辺を単純支持とし、 $x=a/2$ の辺に対称性の境界条件を設け、 $y=b$ の辺を自由辺とする。さらに、面内方向に対して、 $y=0$ の辺の y 軸方向の変位および $x=a/2$ の辺の x 軸方向の変位を拘束する。 $x=0$ の辺を x 軸方向に強制変位させることによって、長方形板に圧縮荷重を与える。図-3.3(b)に示す、対称条件を用いない場合、面外方向に対して、 $x=0$ と a の辺および $y=0$ の辺を単純支持とし、 $y=b$ の辺を自由辺とする。さらに、面内方向に対して、 $y=0$ の辺の y 軸方向の変位および $x=a$ の辺の x 軸方向の変位を拘束する。 $x=0$ の辺を x 軸方向に強制変位させることによって、長方形板に圧縮荷重を与える。

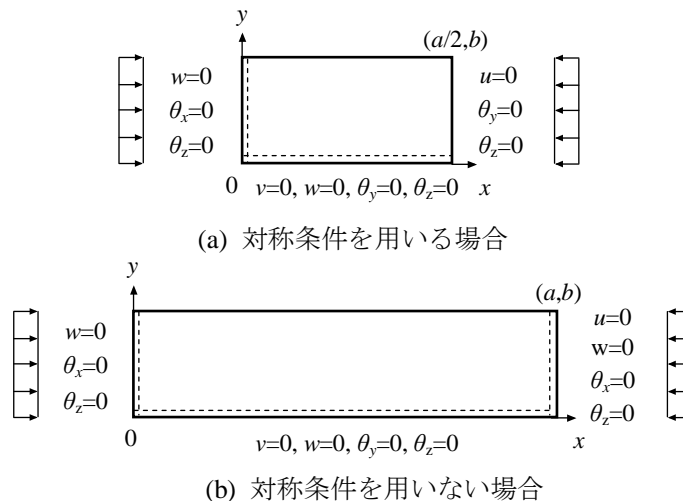


図-3.3 境界条件

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 MARC¹⁵⁾を使用する。有限要素として8節点アイソパラメトリックシェル要素 (MARCにおける要素番号

22) を用いる。耐荷力と板幅方向の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、 $a=500\text{mm}$ 、 $b=100\text{mm}$ の端部接合板に対する結果である。 $w_{0\text{max}}=b/100$ 、 $m=1$ の初期たわみと、図-3.2(a)に示す残留応力を考慮している。長方形板を正方形の要素で、 10×4 、 20×8 、 30×12 、 40×16 に分割する。ここで、 10×4 において、10 は x 軸方向の要素分割数、4 は y 軸方向の要素分割数である。接合部の幅は 25mm と一定であるため、接合部の板幅方向の要素分割数は、 10×4 、 20×8 、 30×12 、 40×16 の要素分割に対して、それぞれ 1 要素、2 要素、3 要素、4 要素になる。他方、図-3.4 の σ_u は、有限要素法解析において、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、 R 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 4 章で説明する。図-3.4 から分るように、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は、 R の各値に対して、板幅方向の要素分割数に係わらず同じである。したがって、 $a=500\text{mm}$ 、 $b=100\text{mm}$ の端部接合板の要素分割は 10×4 で十分と言えるが、本研究では 20×8 を採用する。このとき、 25mm 幅の接合部は板幅方向に 2 要素で分割されるので、1 要素の 1 辺の大きさは 12.5mm になる。以上より、 100mm より大きい板幅の端部接合板、および 200mm より大きい板幅の中間接合板と増厚中間接合板に対して、1 辺の大きさが 12.5mm の正方形の要素で全体を分割する。中間接合板と増厚中間接合板の接合部の幅は 50mm であるので、接合部は幅方向に 4 要素で分割されることになる。

非接合板に対しては、0.2% 耐力およびひずみ硬化パラメータの値が全領域で一定であるので、板幅方向が 8 要素の等分割になるように正方形の要素で全体を分割する。

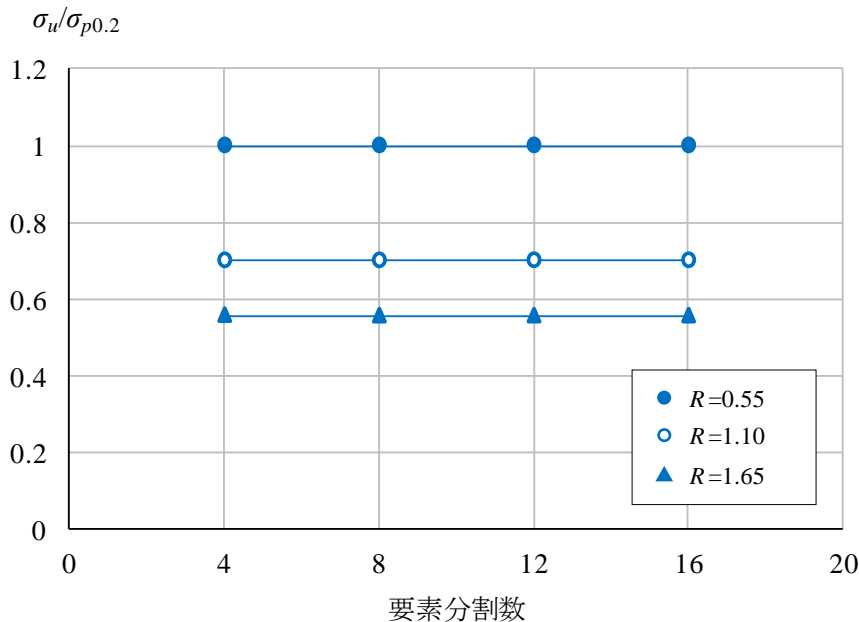


図-3.4 耐荷力と板幅方向の要素分割数の関係

第 4 章 耐荷力表示で使用されるパラメータ

4.1 圧縮強度の上限値

第 3 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．

$$\sigma_{p0.2} = \frac{A - A_j}{A} \sigma_{0.2} + \frac{A_j}{A} \sigma_{j0.2} \quad (4.1)$$

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

端部接合板 [図-2.2(b)] と中間接合板 [図-2.2(c)] 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 $\sigma_{p0.2}$ はそれぞれ次式で与えられる．

$$\sigma_{p0.2} = \frac{b - 25}{b} \sigma_{0.2} + \frac{25}{b} \sigma_{j0.2} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{p0.2} = \frac{b - 50}{b} \sigma_{0.2} + \frac{50}{b} \sigma_{j0.2} \quad (4.3)$$

ここに， b の単位 : mm

非接合板 [図-2.2(a)] ，増厚中間接合板 [図-2.2(d)] 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，非接合板，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．

$$\sigma_{p0.2} = \sigma_{0.2} \quad (4.4)$$

本研究では，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-4.1 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-4.1 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 | 端部接合板 | 中間接合板 | 増厚中間接合板 |
|---|------|-------|-------|---------|
| A6061-T6 A6005C-T5 | A | B | C | A |
| A5083-O | A | A | A | — |
| <p>A : $\sigma_{p0.2} = \sigma_{0.2}$</p> <p>B : $\sigma_{p0.2} = \frac{b - 25}{b} \sigma_{0.2} + \frac{25}{b} \sigma_{j0.2}$</p> <p>C : $\sigma_{p0.2} = \frac{b - 50}{b} \sigma_{0.2} + \frac{50}{b} \sigma_{j0.2}$</p> <p>$b$: 板幅 (単位 mm)</p> | | | | |

4.2 幅厚比パラメータ

4.1 節で述べた，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．

$$R_k = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k} \frac{\sigma_{p0.2}}{E} \frac{b}{t}} \quad (4.5)$$

ここに， R_k : 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

E : ヤング係数 (=70GPa)

t : 板厚

自由突出板の座屈係数は次式で与えられる¹⁶⁾．

$$k = 0.425 + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (4.6)$$

式(4.6)は縦横比 a/b が大きくなると 0.425 になる．座屈係数 k に対して 0.425 の固定値を使用した場合の幅厚比パラメータが次式で定義される．

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{0.425} \frac{\sigma_{p0.2}}{E} \frac{b}{t}} \quad (4.7)$$

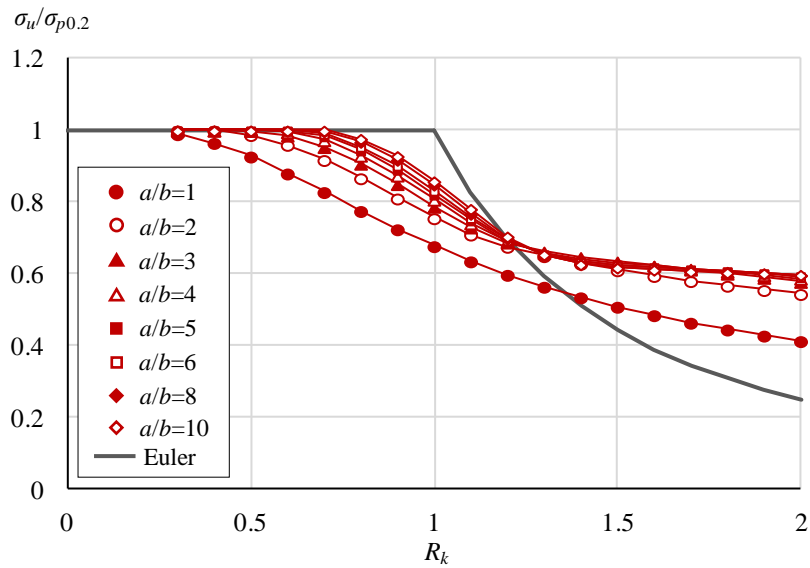
R と R_k の間には次の関係がある．

$$\frac{R}{R_k} = \sqrt{1 + \frac{1}{0.425} \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (4.8)$$

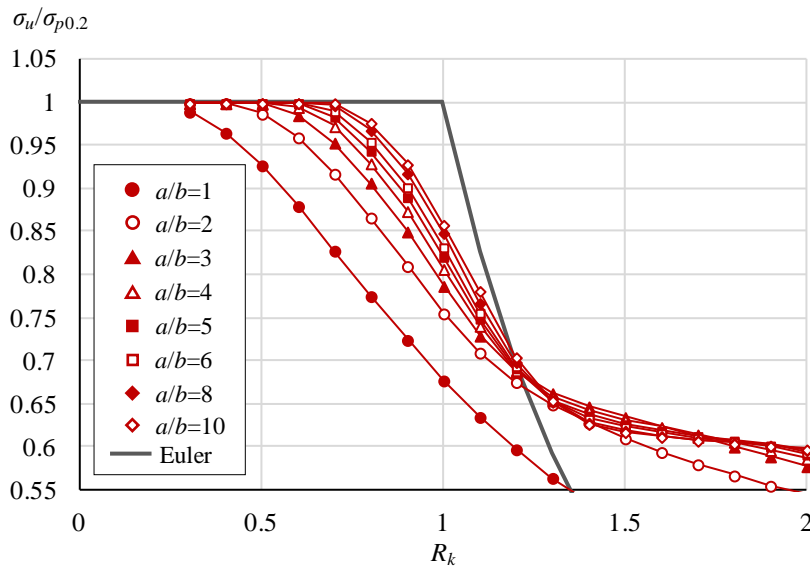
R が R_k より大きくなる．

第5章 縦横比が耐力に与える影響

アルミニウム合金 A6061-T6 の非接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_k$ 関係を図-5.1 に示す(数値データは付録 A 参照) . 板幅を $b=300\text{mm}$ として, 縦横比 a/b を変化させている. $w_{0\text{max}}=b/100$, $m=1$ の初期たわみを考慮している. 式(4.5)で定義される幅厚比パラメータ R_k が横軸に採られている. 図-5.1 から分かるように, $a/b=1$ の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は, 他の縦横比のそれと比較して大幅に低い. R_k が 1.2 以下の範囲では, a/b が大きくなるに従って $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が上昇し, R_k が 1.2 以上の範囲では, a/b が 3 以上の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ はお互いに近い値をとる.



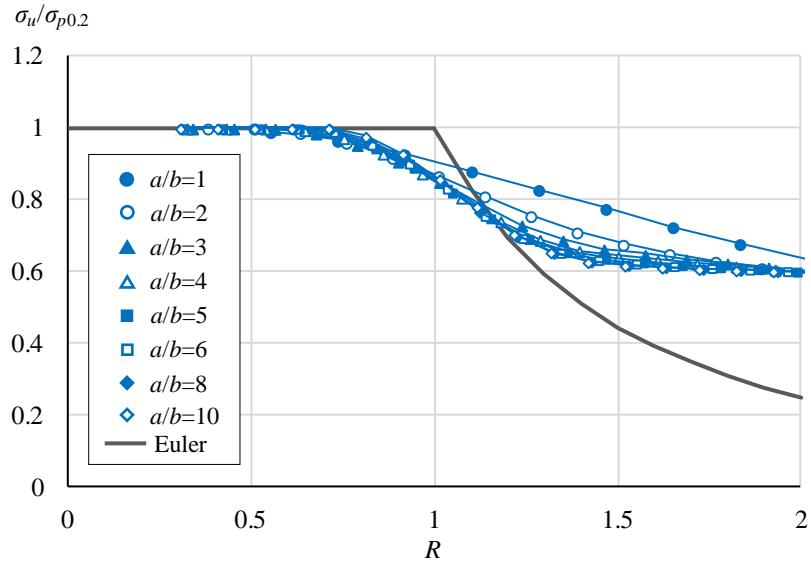
(a) 全体図



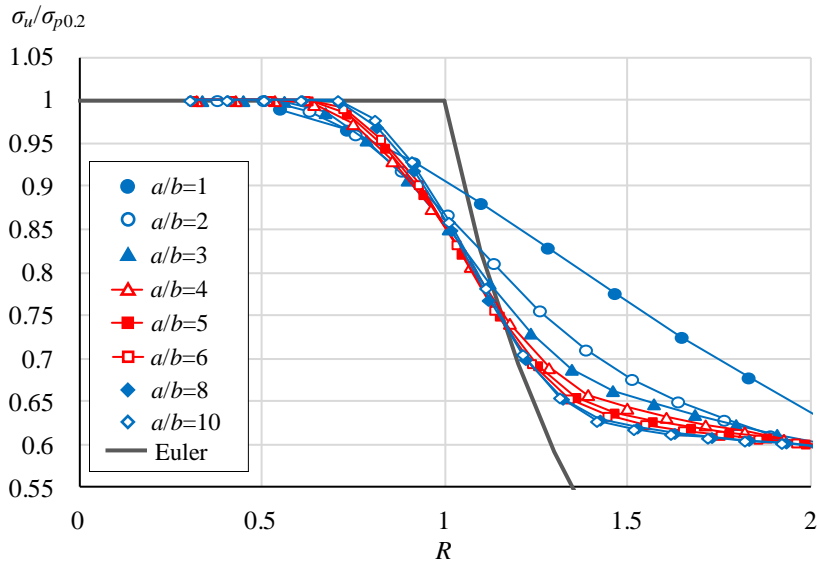
(b) 部分拡大図

図-5.1 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_k$ 関係

次に、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係を図-5.2 に示す。式(4.7)で定義される幅厚比パラメータ R が横軸に採られている。図-5.2(b)から分かるように、 R が 0.9 以下の領域では、全ての a/b に対して $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ はお互いに近い値をとり、 R が 0.9 以上の領域では、 $a/b=1$ と 2 の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が、他の a/b に対する $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ より高く、 a/b が 3 以上の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は、お互いに近い値をとる。



(a) 全体図



(b) 部分拡大図

図-5.2 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係

縦横比による $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ の変動は、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係の方が、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R_k$ 関係より小さいので、耐荷力曲線の作成には、前者の方が優れていると言える。図-5.2(b)から分かるように、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ の下

限值を与える縦横比は R の値によって異なる。 $a/b=4, 5, 6$ に対する $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係を赤色の線で示す。 R が 1.2 以下の領域では、これらの縦横比に対する $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ はお互いに近いが、 R が 1.2 以上の領域では、 $a/b=5$ と 6 の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ はお互いに近いが、 $a/b=4$ の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は、 $a/b=5$ と 6 のそれよりも幾分大きい。したがって、次章以降では、縦横比 a/b が 5 の長方形板に対して解析を行い、耐荷力表示は $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係で表す。

第6章 初期たわみが耐荷力に与える影響

6.1 初期たわみ形状が耐荷力に与える影響

初期たわみ形状が耐荷力に与える影響を図-6.1 に示す。解析対象は、アルミニウム合金が A6061-T6 で、 $a=1500\text{mm}$ 、 $b=300\text{mm}$ の非接合板である。初期たわみに対して、最大初期たわみを $w_{0\max}=b/100$ として、 $m=1, 2, 3, 4, 5$ の初期たわみ形状を考慮している。図-6.1 に示すように、 R が 0.6 から 0.8 の範囲で、 $m=1$ に対する耐荷力が他のモード数に対するそれより幾分高い。 R が 0.8 以上の範囲では、モード数が大きくなるに従って、耐荷力が上昇する。

R が 0.6 から 0.8 の範囲で、 $m=1$ に対する耐荷力が他のモード数に対するそれより幾分高くなる原因が数値計算誤差によるものであるかどうかを調べるために、板幅方向の要素分割数を 8 から 12 に増やして、計算を実施したが、上記と同じ結果であった（付録 B の図-B.1 参照）。さらに、縦横比 a/b が 3 と 4 の長方形板（板幅方向の分割数 8）に対して計算を行ったが、上記と同じ結果であった（付録 B の図-B.2 参照）。したがって、 R が 0.6 から 0.8 の範囲で、 $m=1$ に対する耐荷力が他のモード数に対するそれより幾分高くなるのは、数値計算誤差によるものではないと考えられる。

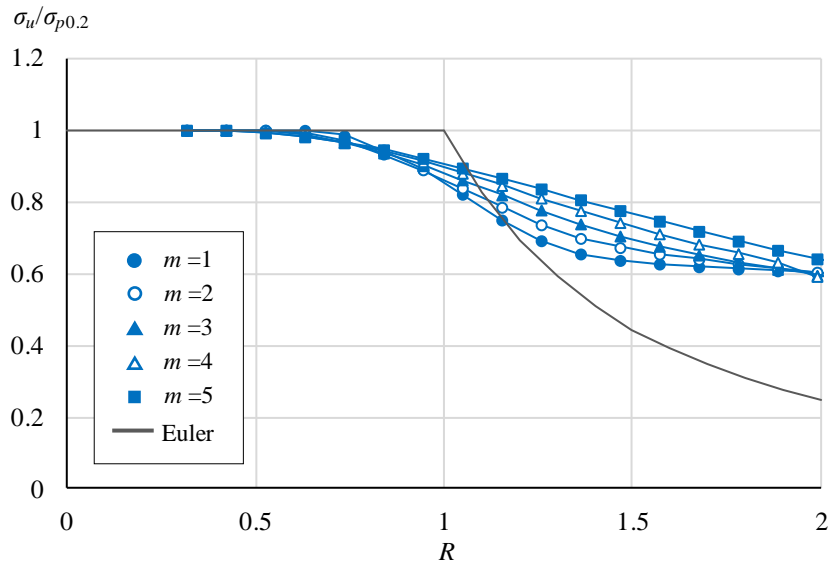


図-6.1 初期たわみ形状が耐荷力に与える影響

$R=1.05$ に対して、最大荷重に達したときの面外変位を図-6.2 に示す。 $m=1, 3, 5$ の初期たわみ形状の場合、初期たわみ形状が左右対称であるため、長方形板の左側半分の面外変位を示し、 $m=2$ と 4 の初期たわみ形状の場合、初期たわみ形状が左右非対称であるため、長方形板全体の面外変位を示している。面外変位の大きさは、色による等高線で識別される。面外変位の形状は、初期たわみ形状と同じである。各面外変位において、凸と凹の各最大の変位の大きさはほぼ同じである。

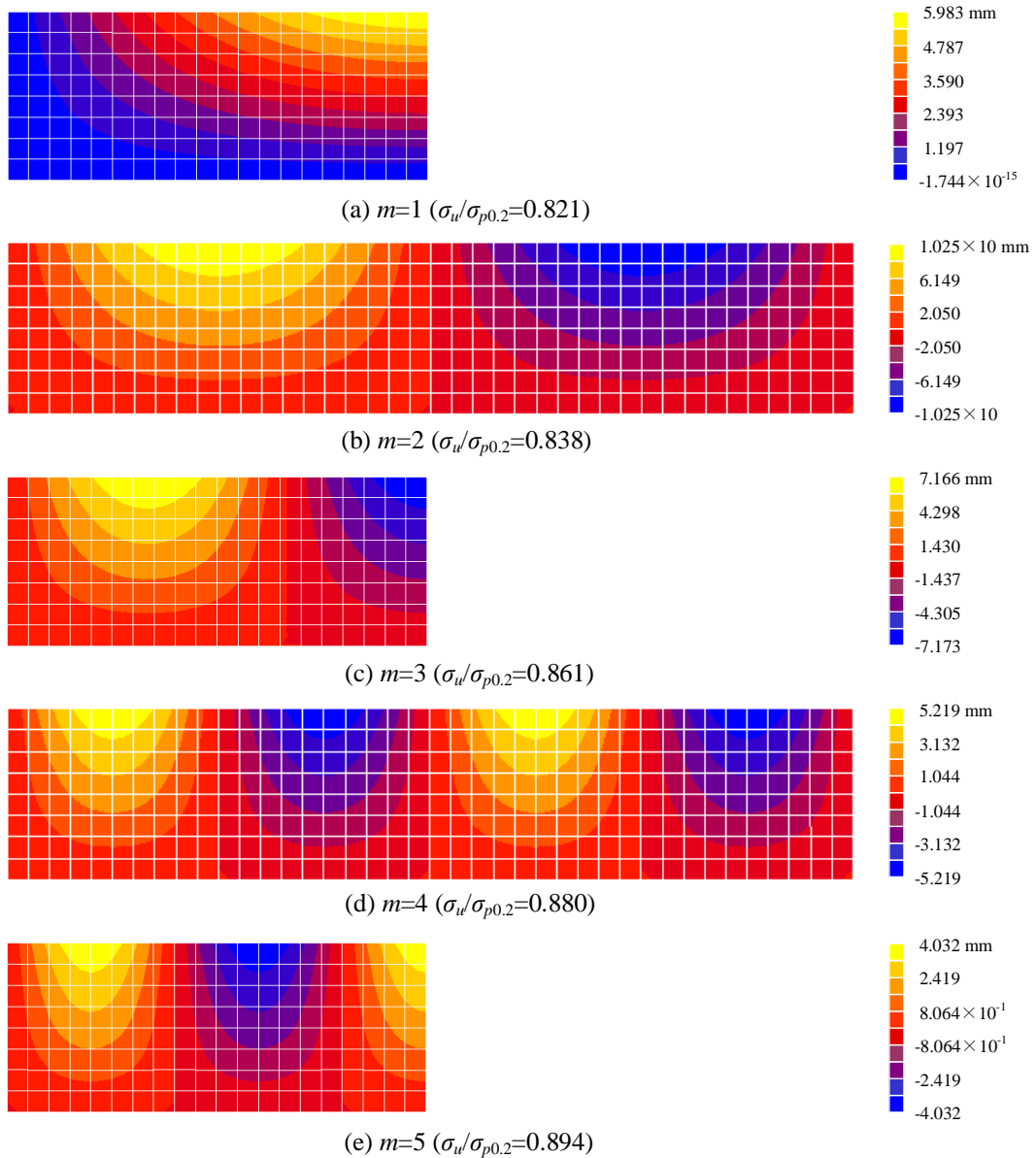
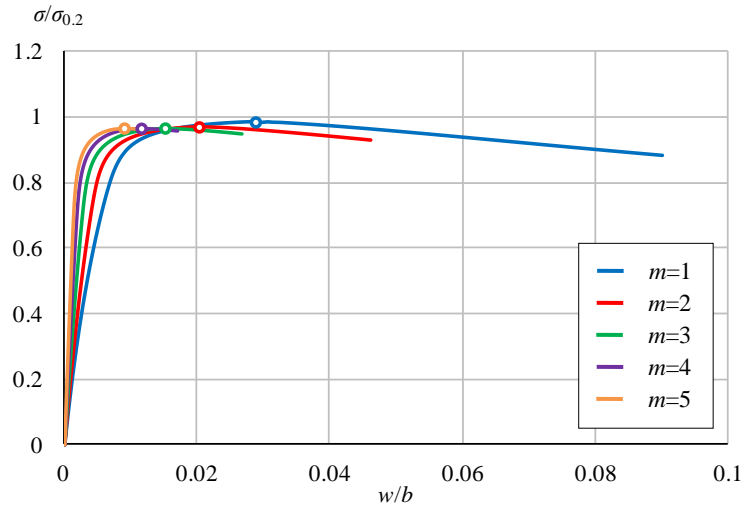
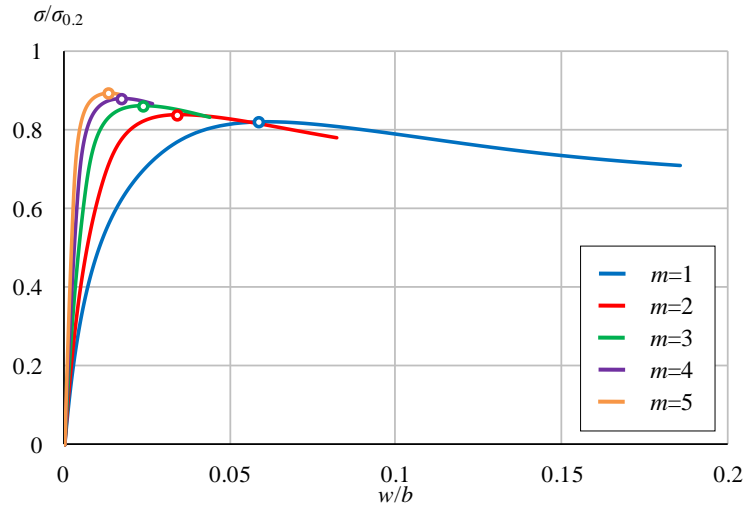


図-6.2 面外変位 ($R=1.05$)

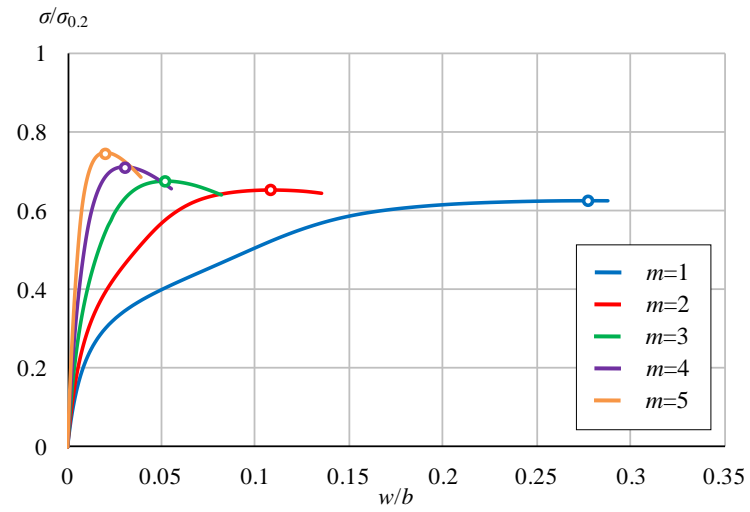
$R=0.73, 1.05, 1.57$ に対する荷重と面外変位の関係を図-6.3に示す。面外変位は、 $m=1, 3, 5$ の場合、点 $(a/2, b)$ 、 $m=2$ の場合、点 $(a/4, b)$ 、 $m=4$ の場合、点 $(3a/8, b)$ の面外変位である。面外変位 w は板幅 b で無次元化されている。図中の白丸は荷重が最大となる点である。図-6.3 から分かるように、幅厚比パラメータの各値において、モード数が大きくなるに従って、荷重が最大となるときの面外変位は小さくなる。



(a) $R=0.73$



(b) $R=1.05$



(c) $R=1.57$

図-6.3 荷重と面外変位の関係

荷重が最大となるときの面外変位と幅厚比パラメータの関係を図-6.4に示す。 $m=4$ の場合、面外変位が $R=1.99$ で特異な値を示している。

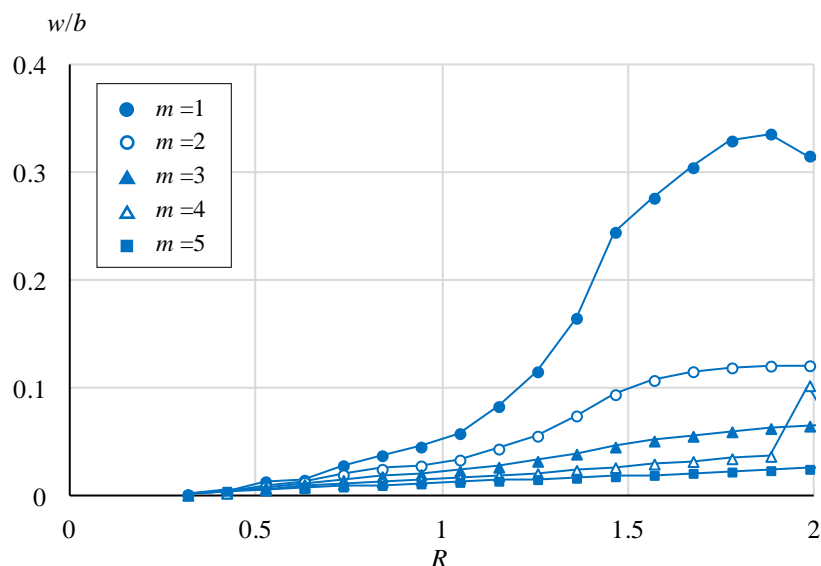


図-6.4 面外変位と幅厚比パラメータの関係

$m=4$ の $R=1.99$ の場合、荷重が低いとき、面外変位は4モードで進み、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=0.557$ で、凸と凹の各最大の変位の大きさが等しくなくなり、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=0.580$ で2モードに急変し、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=0.593$ で最大荷重に達する。このときの面外変位を図-6.5に示す。この原因を調べるために、板幅方向の分割数を8から12に増やして、計算を実施した。荷重が低いとき、面外変位は4モードで進み、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=0.564$ で、凸と凹の各最大の変位の大きさが等しくなくなり、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=0.577$ で2モードに急変し、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=0.593$ で最大荷重に達した。したがって、 $m=4$ の $R=1.99$ の場合、面外変位が4モードから2モードに急変した後、最大荷重に達するのは、数値計算誤差によるものではないと考えられる。

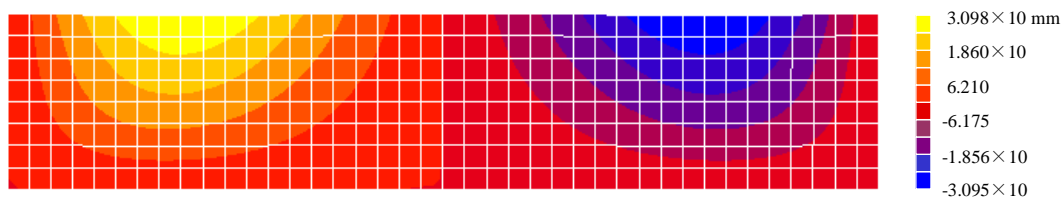
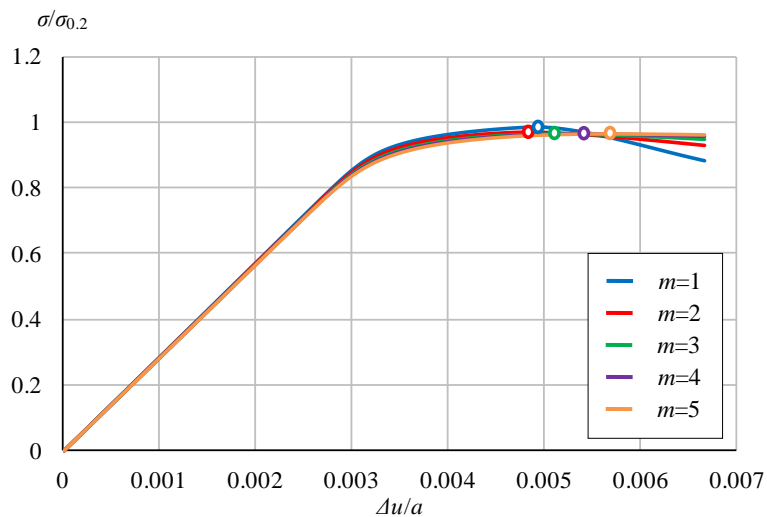


図-6.5 面外変形 ($m=4$, $R=1.99$, $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=0.593$)

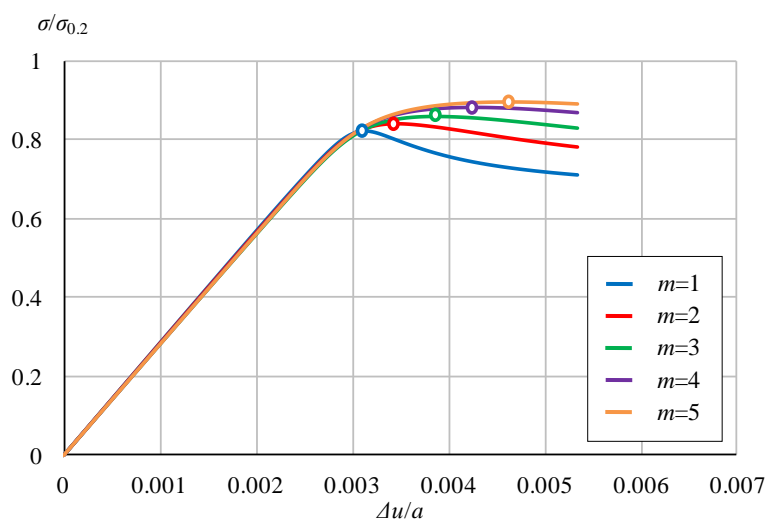
$R=0.73$, 1.05 , 1.57 に対する荷重と強制変位の関係を図-6.6に示す。強制変位 Δu が板の長さ a で無次元化されている。図中の白丸は荷重が最大となる点である。

$R=0.73$ の場合、図-6.6(a)に示すように、最大荷重に達するときの $m=1$ の強制変位は $m=2$ のそれよりわずかに大きい。 $m=2$ 以上のモードでは、モード数が大きくなるに従って、最大荷重に

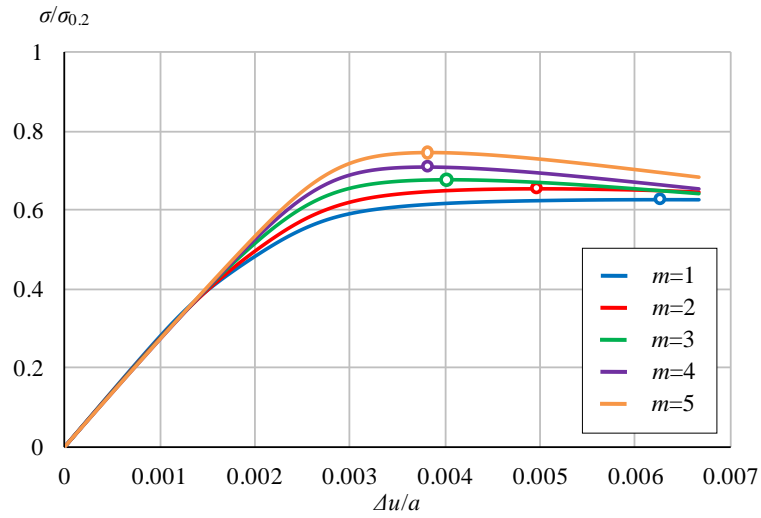
達するときの強制変位が大きくなる。 $R=1.05$ の場合、図-6.6(b)に示すように、モード数が大きくなるに従って、最大荷重に達するときの強制変位が大きくなる。 $R=1.57$ の場合、図-6.6(c)に示すように、モード数が大きくなるに従って、最大荷重に達するときの強制変位が小さくなり、 $m=4$ と 5 の強制変位は同じ値になる。



(a) $R=0.73$



(b) $R=1.05$



(c) $R=1.57$

図-6.6 荷重と強制変位の関係

荷重が最大となるときの強制変位と幅厚比パラメータの関係を図-6.7 に示す。 R が 0.6 から 1.3 の範囲では、モード数が大きくなるに従って、強制変位が大きくなり、 R が 1.3 以上の範囲では、モード数が大きくなるに従って、強制変位が小さくなる。

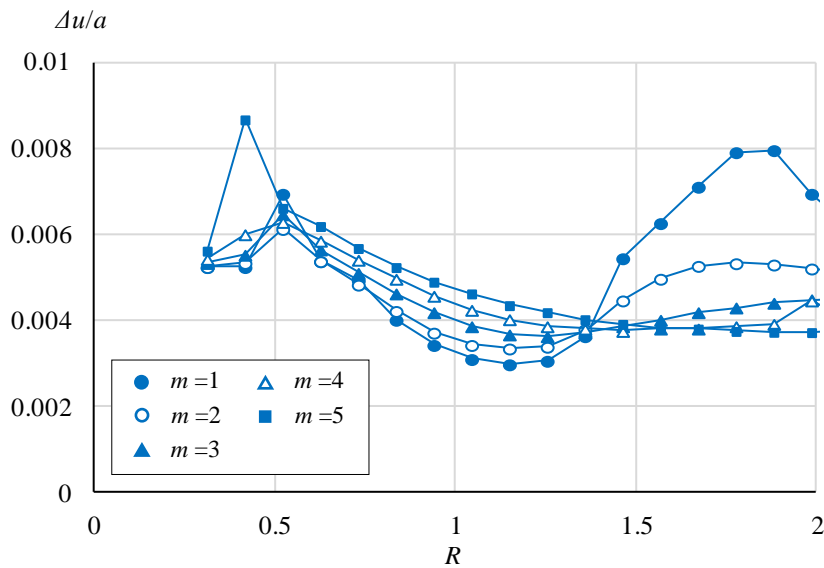


図-6.7 強制変位と幅厚比パラメータの関係

6.2 最大初期たわみが耐荷力に与える影響

最大初期たわみの大きさが耐荷力に与える影響を図-6.4 に示す。解析対象は、アルミニウム合金が A6061-T6 で、 $a=1500\text{mm}$ 、 $b=300\text{mm}$ の非接合板である。初期たわみに対して、 $m=1$ として、

$w_{0\max}=b/100, b/150, b/200, b/500, b/1000$ の5つの最大初期たわみを考慮している。 $w_{0\max}=b/100$ は、JAA 指針¹³⁾で規定されるフランジの最大初期たわみである。

図-6.4 から分かるように、 R が 0.8 から 1.3 の範囲において、最大初期たわみが小さくなるに従って、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が上昇するが、 R が 1.3 以上の範囲では、最大初期たわみの大きさは耐荷力に影響しない。

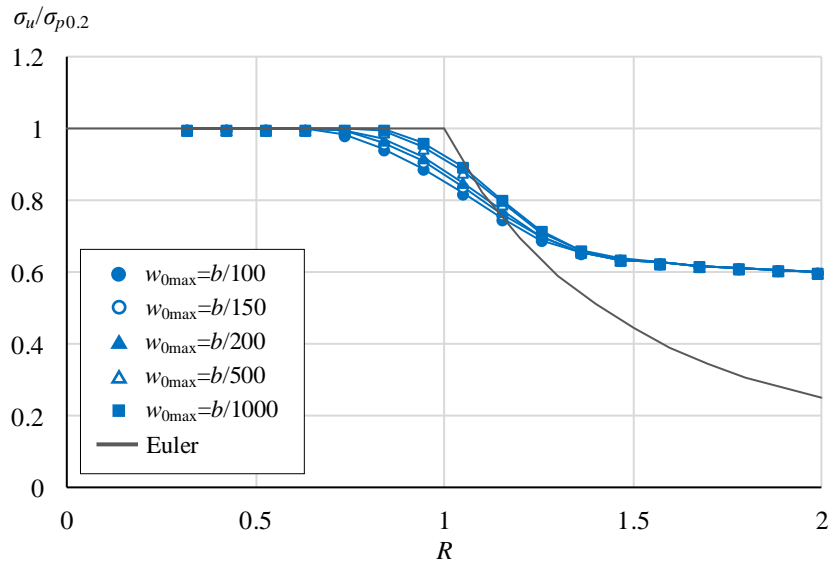


図-6.4 最大初期たわみが耐荷力に与える影響

第7章 6000系アルミニウム合金板の耐荷力

7.1 端部接合板

アルミニウム合金 A6061-T6 の端部接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係を図-7.1 (数値データは付録 C 参照) に示す. 板幅 b に対して, 100mm, 200mm, 300mm を考慮し, $w_{0\max}=b/100$, $m=1$ の初期たわみを考慮している. さらに残留応力の有無を考慮している. 図-7.1 から分かるように, 端部接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は, 板幅が大きくなるに従って上昇し, 非接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ に近づく. これは, 接合部の幅が一定であるために, 板幅が大きくなるに従って, 板の全断面積に対する接合部の断面積の比率が低下するためである. $b=100\text{mm}$ の場合, R が 0.8 から 1.2 の範囲で, 残留応力が存在することにより, $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ がわずかに低下するが, R が 1.2 以上の範囲では, 残留応力の影響はない. $b=200\text{mm}$ と 300mm の場合, 残留応力の影響はないので, 残留応力ありとなしの解析結果は重なっている.

圧縮残留応力 σ_{rc} が母材の 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ で無次元化された値を表-7.1 に示す. 同表には, 後で述べる中間接合板と増厚中間接合板に対する値も示してある. A6061-T6 の端部接合板の $\sigma_{rc}/\sigma_{0.2}$ の値は, 鋼の溶接板における, 降伏応力に対する圧縮残留応力の比¹⁷⁾と比較すると, 2, 3 倍小さい. このように, A6061-T6 の端部接合板の場合, 圧縮残留応力が母材の 0.2%耐力よりかなり小さいことが, 残留応力が耐荷力に及ぼす影響が小さい理由と考えられる.

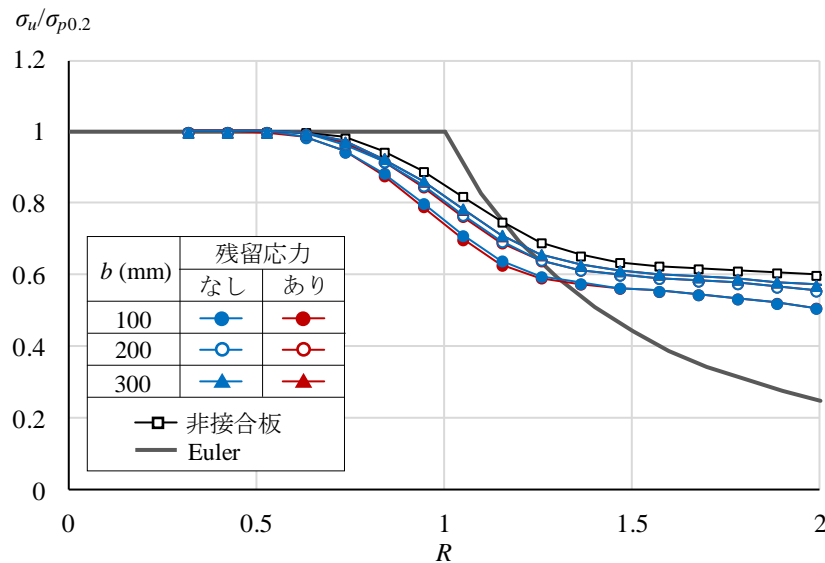


図-7.1 端部接合板の耐荷力 (A6061-T6)

表-7.1 接合板の圧縮残留応力 $\sigma_{rc}/\sigma_{0.2}$ の値

| 接合板 | b (mm) | $\sigma_{rc}/\sigma_{0.2}$ | |
|---------|--------|----------------------------|-----------|
| | | A6061-T6 | A6005C-T5 |
| 端部接合板 | 100 | 0.147 | 0.187 |
| | 200 | 0.063 | 0.08 |
| | 300 | 0.040 | 0.051 |
| 中間接合板 | 300 | 0.088 | 0.112 |
| 増厚中間接合板 | 300 | 0.2 | 0.2 |

7.2 中間接合板

アルミニウム合金 A6061-T6 の中間接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係を図-7.2 に示す (数値データは付録 C 参照). 板幅を $b=300\text{mm}$ として, 支持辺から接合中心までの距離 c に対して, 100mm, 200mm, 250mm を扱っている. $w_{0\text{max}}=b/100$, $m=1$ の初期たわみと残留応力の有無を考慮している. 図-7.2 から分かるように, 中間接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は, $c=100\text{mm}$ の場合, 非接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ より低いが, $c=200\text{mm}$ の場合, 非接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ とほぼ同じになり, $c=250\text{mm}$ の場合, 非接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ より高くなる. すなわち, 中間接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は, 接合中心が自由辺に近づくに従って上昇する.

図-7.2 に示すように, $c=100\text{mm}$ と 200mm の場合, 残留応力ありとなしの解析結果が重なっている. これは, 表-7.1 に示すように, 圧縮残留応力が母材の 0.2% 耐力よりかなり小さいためである. $c=250\text{mm}$ の場合, R が 1.0 から 1.4 の範囲で, 残留応力の存在により, $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ がわずかに増加している. これは, 50mm 幅の接合部に存在する, 母材の 0.2% 耐力に対して 0.441 倍の大きさの引張残留応力が, 荷重作用によって生じる圧縮応力を相殺するためと考えられる.

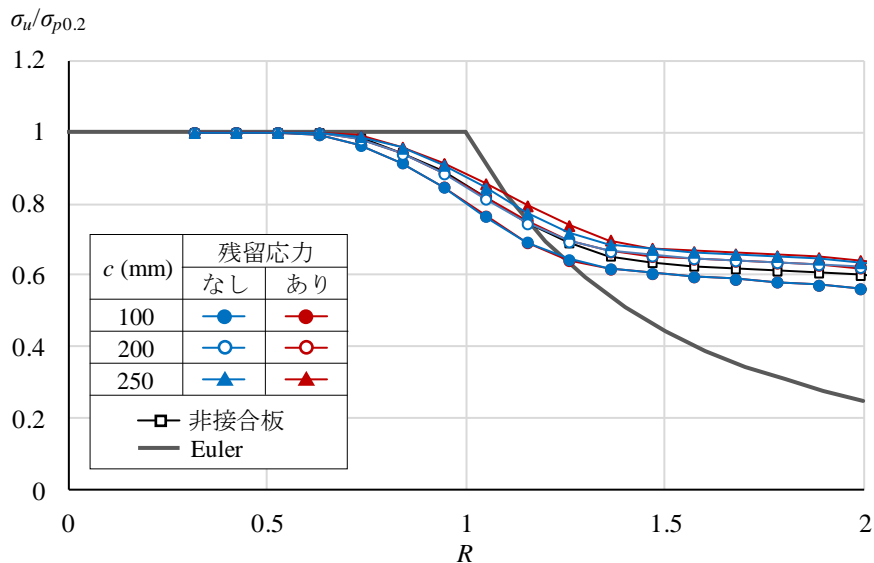


図-7.2 中間接合板の耐荷力 (A6061-T6)

$c=100\text{mm}$ として、板幅 b を 200mm , 300mm , 400mm と変化させた場合に対する $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係を図-7.3 に示す（数値データは付録 C 参照）。残留応力を考慮していない。 R が 1.2 以下の範囲では、板幅 b の変化に対して $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は同じであるが、 R が 1.2 から 2.0 の範囲では、 $b=200\text{mm}$ の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が、 $b=300\text{mm}$ と 400mm のそれよりわずかに大きくなる。

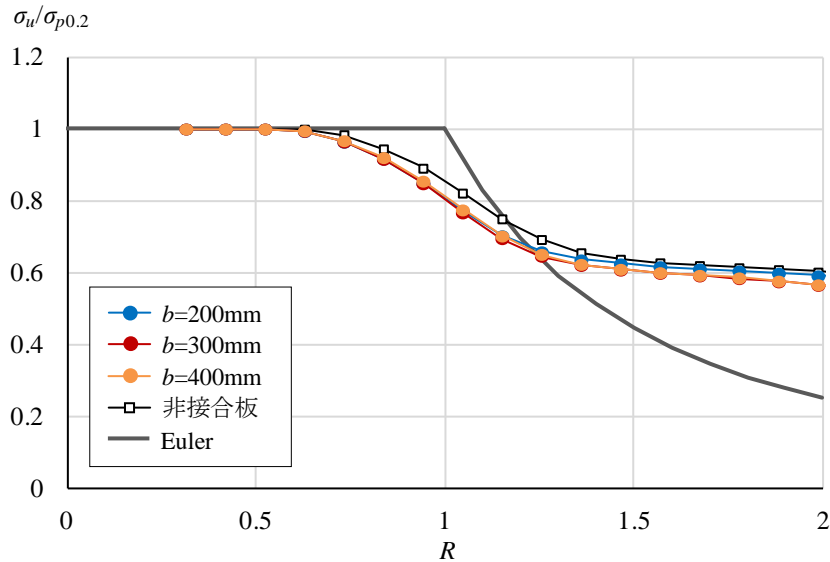


図-7.3 板幅が中間接合板の耐荷力に与える影響 (A6061-T6)

7.3 増厚中間接合板

アルミニウム合金 A6061-T6 の増厚中間接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係を図-7.4 に示す（数値データは付録 C 参照）。本解析は、式(2.1)で与えられる厚さを 50mm 幅の接合部に与えること以外、前節の中間接合板と同じ解析条件である。図-7.4 から分かるように、幅厚比パラメータ R が 0.9 から 1.7 の範囲で、増厚中間接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が非接合板のそれよりかなり高くなる。これは、接合部が増厚されることによって断面二次モーメントが増加することによって面外変形が抑制されるためである。これに関しては、次節でさらに詳述する。接合中心が自由辺に近づくに従って $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は上昇するが、残留応力なしの $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ の上昇の程度は、中間接合板の場合ほど大きくない。残留応力ありの耐荷力はなしの場合より上昇する。この上昇の程度は、中間接合板のそれより大きい。これは、増厚中間接合板の場合、接合部が増厚されるので、引張残留応力に対する断面強度（引張残留応力×厚さ）が中間接合板のそれより大きくなるためであると考えられる。

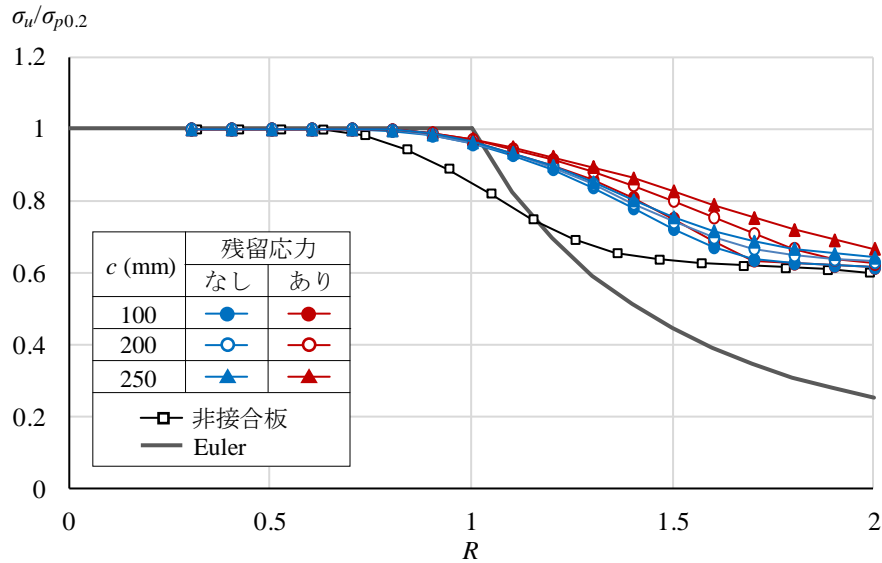


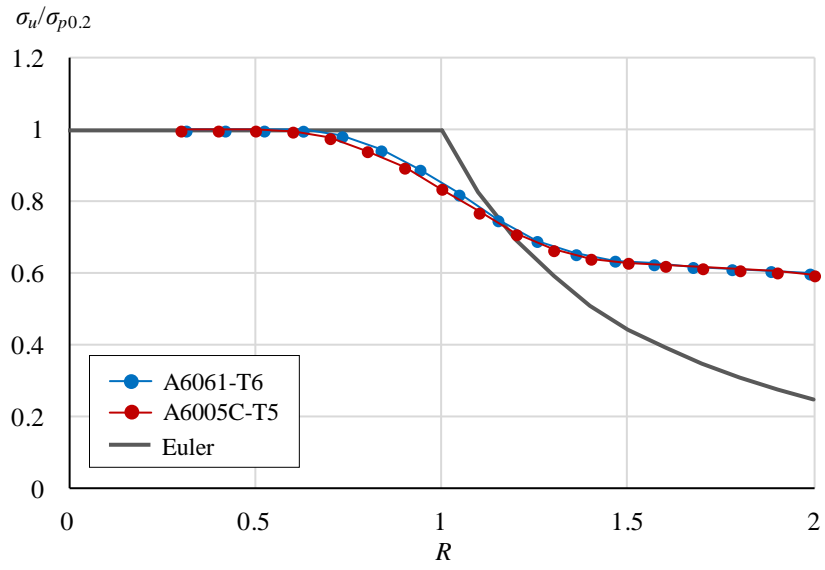
図-7.4 増厚中間接合板の耐荷力 (A6061-T6)

7.4 A6061-T6 板と A6005C-T5 板の耐荷力の比較

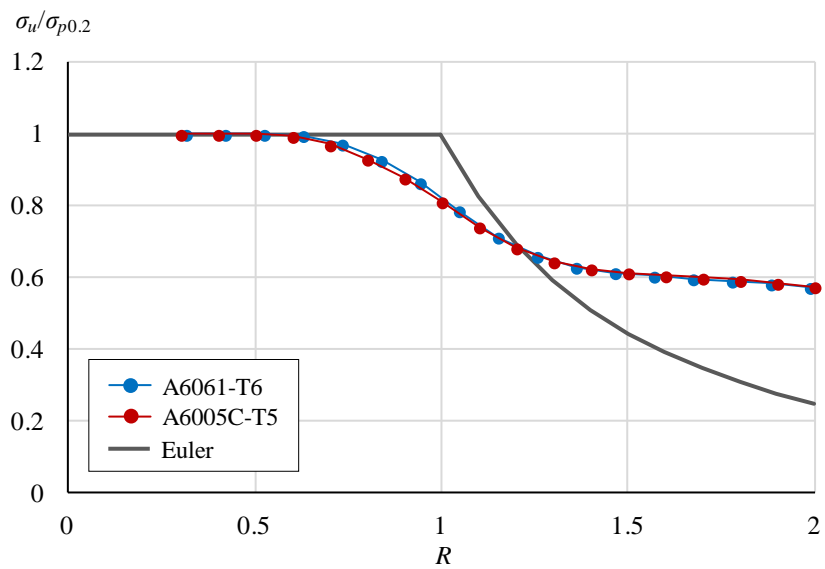
A6061-T6 板と A6005C-T5 板の耐荷力の比較を図-7.5 に示す (数値データは付録 C 参照)。これらの解析結果は、板幅が $b=300\text{mm}$ で、 $w_{0\text{max}}=b/100$ 、 $m=1$ の初期たわみに対するものである。中間接合板と増厚中間接合板の c はともに 100mm である。非接合板、端部接合板、中間接合板の場合、残留応力の影響が小さいので、残留応力を考慮してない。増厚中間接合板の場合、残留応力を考慮しない方が低い耐荷力を与えるので、残留応力を考慮してない。

図-7.5(a), (b), (c)から分かるように、非接合板、端部接合板、中間接合板の各場合において、A6061-T6 板と A6005C-T5 板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係はほぼ一致している。

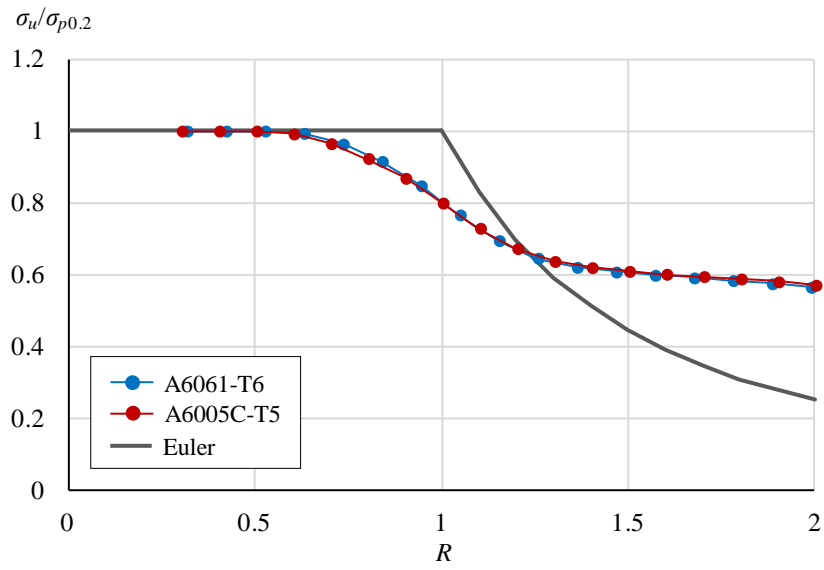
図-7.5(d)から分かるように、増厚中間接合板の場合、 R が 0.8 から 1.6 の範囲で、A6005C-T5 板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が A6061-T6 板のそれより低い。式(2.1)から計算される母材の板厚に対する増厚部の厚さが、A6005C-T5 板では 1.78 倍、A6061-T6 板では 2.26 倍であり、A6005C-T5 板の増厚部の厚さが A6061-T6 板の増厚部の厚さより小さい。したがって、A6005C-T5 板の増厚部の断面二次モーメントが、A6061-T6 板のそれよりも小さくなるので、図-7.6(a)に示すように、 $R=1.3$ の場合、A6005C-T5 の増厚中間接合板の面外変位が A6061-T6 の増厚中間接合板のそれより大きくなり、前者の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が後者のそれより小さくなる。しかし、図-7.6(b)に示すように、 $R=2.0$ の場合、荷重が低い段階では、A6061-T6 板の面外変位は A6005C-T5 板のそれより小さいが、荷重が大きくなると、A6061-T6 板の面外変位は A6005C-T5 板のそれに近づき、両者の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ はほぼ等しくなる。さらに、両者の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は非接合板のそれにほぼ等しくなる。図-7.6(a)と(b)で、白丸は荷重が最大となる点を示す。



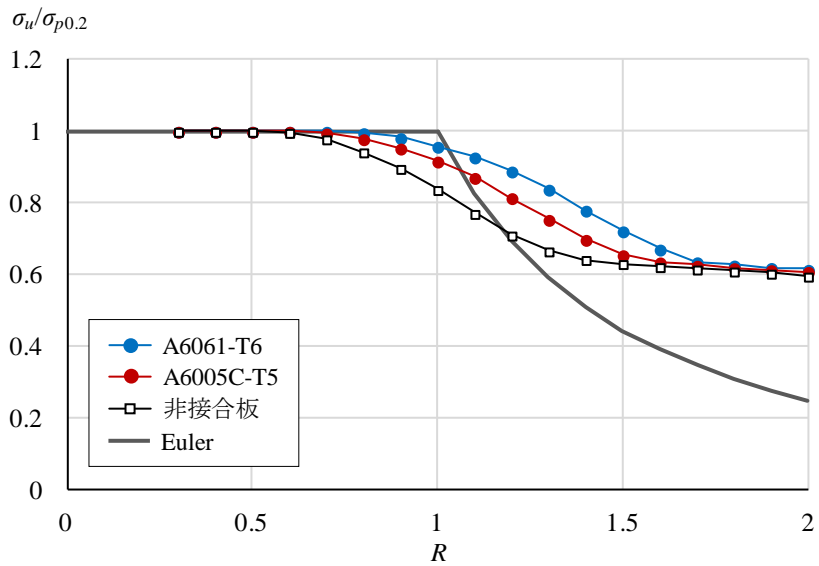
(a) 非接合板



(b) 端部接合板

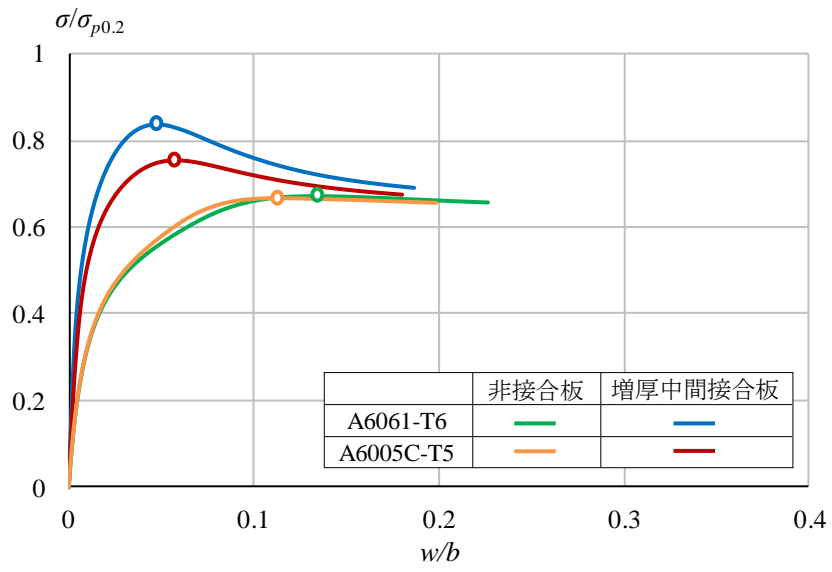


(c) 中間接合板

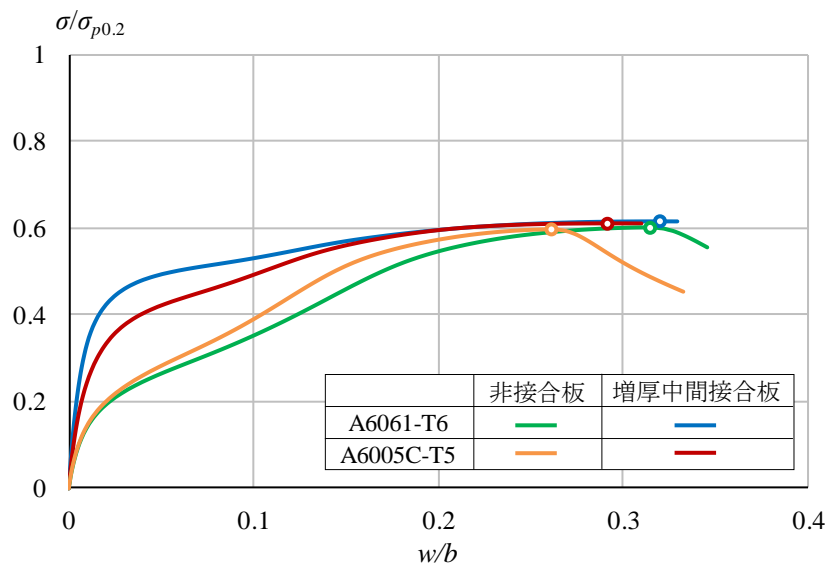


(d) 増厚中間接合板

図-7.5 A6061-T6 板と A6005C-T5 板の耐荷力の比較



(a) $R=1.3$



(b) $R=2.0$

図-7.6 荷重と面外変位の関係

第 8 章 A5083-O 板の耐荷力

アルミニウム合金 A5083-O の端部接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係を図-8.1 に示す（数値データは付録 C 参照）。板幅に対して $b=100\text{mm}$, 200mm , 300mm を考慮し, $w_{0\text{max}}=b/100$, $m=1$ の初期たわみと残留応力を考慮している。図-8.1 から分かるように, 端部接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は, 残留応力の影響により, $b=100\text{mm}$ の場合, R が 0.5 から 1.1 の範囲で, 非接合板のそれよりわずかに低下する。圧縮残留応力 σ_{rc} が母材の 0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ で無次元化された値を表-8.1 に示す。同表には, 後で述べる中間接合板に対する値も示してある。端部接合板の $b=100\text{mm}$ に対する $\sigma_{rc}/\sigma_{0.2}$ の値は, 表-7.1 に示す A6061-T6 のそれより大きい。式(3.1)が与える, A6061-T6 と A5083-O の応力-ひずみ関係を図-8.2 に示す。同図から分かるように, A5083-O 板の応力-ひずみ関係は, 0.2% 耐力に近づくに従って大きく曲がる。したがって, A5083-O の場合, 0.2% 耐力に近づくに従って, 応力-ひずみ関係の接線係数が低下することが耐荷力に及ぼす影響が, 残留応力が耐荷力に及ぼす影響より大きいために, 残留応力が耐荷力に及ぼす影響が小さくなると推察される。これと同様の傾向が, 面内せん断を受けるアルミニウム長方形板の耐荷力についても見られる¹⁸⁾。

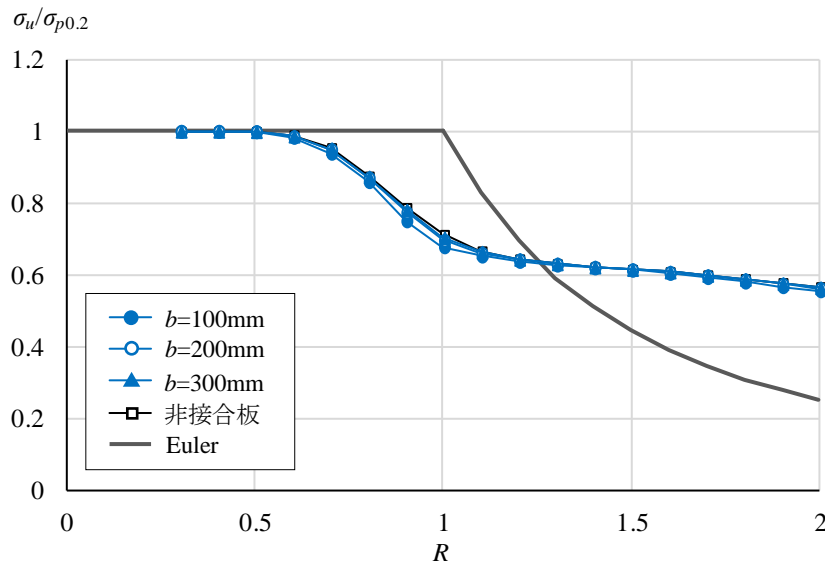


図-8.1 端部接合板の耐荷力 (A5083-O)

表-8.1 接合板の圧縮残留応力 $\sigma_{rc}/\sigma_{0.2}$ の値 (A5083-O)

| 接合板 | b (mm) | $\sigma_{rc}/\sigma_{0.2}$ |
|-------|----------|----------------------------|
| 端部接合板 | 100 | 0.333 |
| | 200 | 0.143 |
| | 300 | 0.091 |
| 中間接合板 | 200 | 0.333 |
| | 300 | 0.2 |
| | 400 | 0.143 |

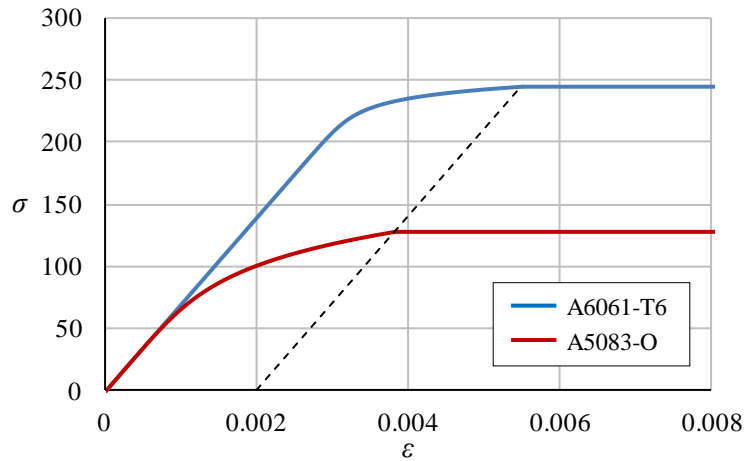


図-8.2 応力-ひずみ関係

アルミニウム合金 A5083-O の中間接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係を図-8.3 に示す (数値データは付録 C 参照). 板幅を $b=300\text{mm}$ として, 支持辺から接合中心までの距離 c に対して, 100mm, 200mm, 250mm を考慮している. $w_{0\text{max}}=b/100$, $m=1$ の初期たわみと残留応力を考慮している. 図-8.3 から分かるように, 中間接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は, A6061-T6 の中間接合板と同じように, 接合中心が自由辺に近づくに従って上昇する.

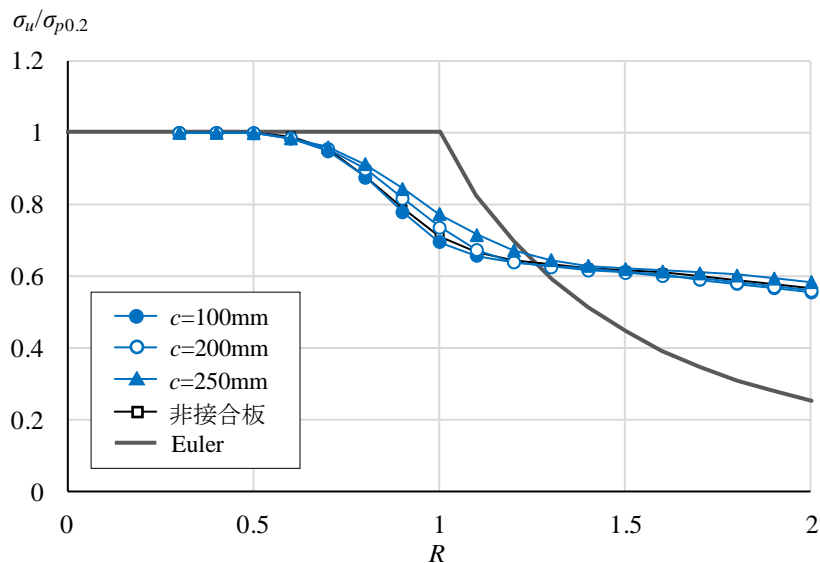


図-8.3 中間接合板の耐荷力 (A5083-O)

$c=100\text{mm}$ として, 板幅 b を 200mm, 300mm, 400mm と変化させた場合に対する $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係を図-8.4 に示す (数値データは付録 C 参照). 残留応力を考慮している. 板幅が変化しても, $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ はほとんど変化しない.

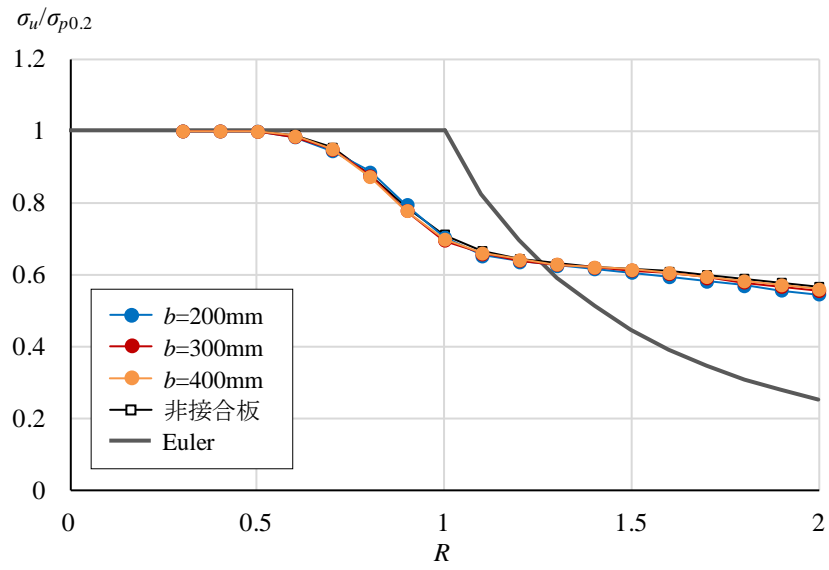


図-8.4 板幅が中間接合板の耐荷力に与える影響 (A5083-O)

第 9 章 耐力力曲線

9.1 耐力力曲線の定式化

アルミニウム合金 A6061-T6, A6005C-T5, A5083-O の自由突出板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係は, 幅厚比パラメータ R のある値で $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=1.0$ に交差し, $0.65 \leq \sigma_u/\sigma_{p0.2} \leq 1.0$ で上に凸の曲線, $\sigma_u/\sigma_{p0.2} \leq 0.65$ で下に凸の曲線になる. そこで, 自由突出板の耐力力を表す曲線として次式を採用する.

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{p0.2}} = \begin{cases} 1 & (R \leq R_{1.0}) \\ 1 - 0.35 \left(\frac{R - R_{1.0}}{R_{0.65} - R_{1.0}} \right)^2 & (R_{1.0} \leq R \leq R_{0.65}) \\ 0.65 \left(\frac{R_{0.65}}{R} \right)^m & (R_{0.65} \leq R \leq 2) \end{cases} \quad (9.1)$$

ここに, $R_{1.0}$: 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

$R_{0.65}$: $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=0.65$ に対する幅厚比パラメータの値

m : 定数

最初に, 解析値に対して $R_{1.0}$ を決める. 次に, $0.65 \leq \sigma_u/\sigma_{p0.2} \leq 1.0$ の解析値に対して, 式(9.1)の中段の式の $R_{0.65}$ の値を最小 2 乗法によって決める. $\sigma_u/\sigma_{p0.2} \leq 0.65$ の解析値に対して, 式(9.1)の下端の式の m の値を最小 2 乗法によって決める. A6061-T6 板, A6005C-T5 板, A5083-O 板に対する, 耐力力曲線の区分と $R_{1.0}$, $R_{0.65}$, m の値を表-9.1 に示す. さらに, これらの耐力力曲線の比較を図-9.1 に示す. 次に耐力力曲線の区分について述べる.

表-9.1 耐力力曲線の区分と $R_{1.0}$, $R_{0.65}$, m の値

| アルミニウム合金 | | A6061-T6 A6005C-T5 | A5083-O |
|---|-----------------------|-----------------------|---------|
| 非接合板 | | JA | JD |
| 増厚中間接合板* ($200 \leq b, 100 \leq c < b$) | | | |
| 端部接合板 | $100 \leq b \leq 200$ | JB | |
| | $200 \leq b$ | JC | |
| 中間接合板 ($200 \leq b, 100 \leq c < b$) | | JC | |

b : 板幅 (mm)

c : 支持辺から接合中心までの距離 (mm)

* : A5083-O に増厚中間接合板は適用されない.

| | $R_{1.0}$ | $R_{0.65}$ | m |
|----|-----------|------------|------|
| JA | 0.6 | 1.24 | 0.16 |
| JB | 0.5 | 1.08 | 0.41 |
| JC | 0.5 | 1.18 | 0.28 |
| JD | 0.4 | 1.02 | 0.2 |

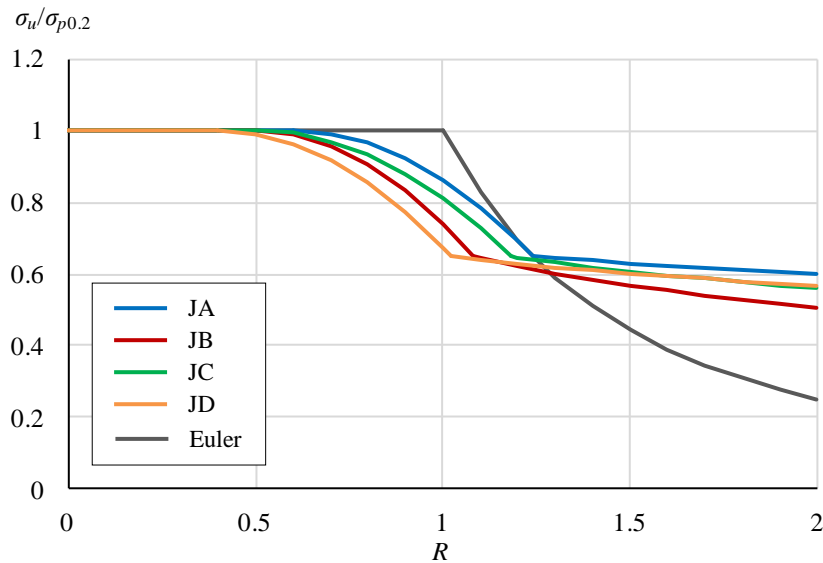


図-9.1 耐荷力曲線の比較

A6061-T6 の非接合板の耐荷力曲線の作成には、図-7.1~7.4 に示す非接合板の解析値を用いる。

図-7.1 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 $100 \leq b \leq 200$ と $200 \leq b$ の二つに区分する。板幅が $100 \leq b \leq 200$ の耐荷力曲線には、板幅が 100mm の FEM 解析値を適用し、板幅が $200 \leq b$ の耐荷力曲線には、板幅が 200mm の FEM 解析値を適用する。板幅が 100mm の場合、残留応力ありの $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が残留応力なしのそれより低いので、残留応力ありの FEM 解析値を適用する。板幅が 200mm の場合、残留応力ありとなしの $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ がほぼ同じであるので、残留応力なしの FEM 解析値を適用する。

図-7.2 に示すように、A6061-T6 の中間接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は、接合中心が自由辺に近づくに従って上昇する。したがって、中間接合板の耐荷力曲線には、 $b=300\text{mm}$ で $c=100\text{mm}$ の FEM 解析値を適用する。この場合、残留応力の影響がほとんどないため、残留応力なしの FEM 解析値を用いる。図-7.3 に示すように、 $b=300\text{mm}$ と $b=400\text{mm}$ の解析値はほぼ同じである。そして、 $b=200\text{mm}$ の解析値は、 R が 1.2 から 2.0 の範囲で、 $b=300\text{mm}$ と $b=400\text{mm}$ の解析値より大きくなる。したがって、 $b=300\text{mm}$ で $c=100\text{mm}$ に対する耐荷力曲線は、板幅が 200mm 以上で、接合中心が 100mm 以上の中間接合板に適用できる。他方、残留応力を考慮しない $b=200\text{mm}$ の端部接合板の耐荷力と $b=300\text{mm}$ で $c=100\text{mm}$ の中間接合板の耐荷力の比較を図-9.2 に示す。両者はほぼ同じであるので、中間接合板の耐荷力は板幅が $200 \leq b$ の端部接合板と同じ区分とする。

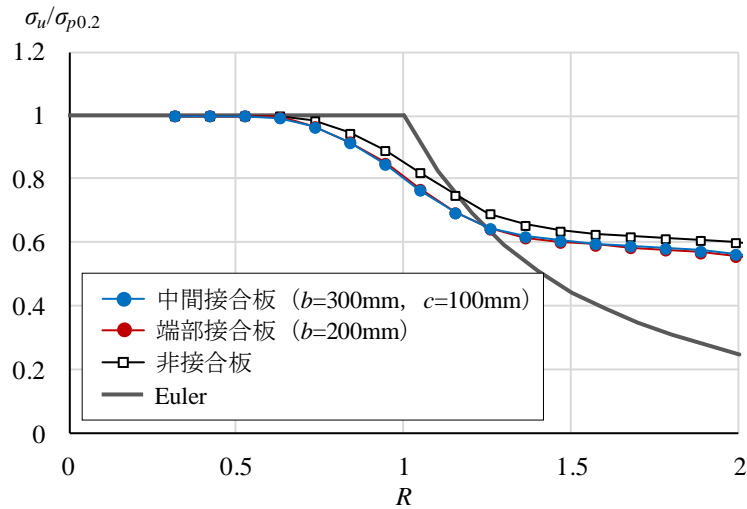


図-9.2 $b=200\text{mm}$ の端部接合板の耐荷力と
 $b=300\text{mm}$ で $c=100\text{mm}$ の中間接合板の耐荷力の比較 (A6061-T6)

図-7.4に示すように, A6061-T6の増厚中間接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ は, 非接合板のそれより高いので, 増厚中間接合板の耐荷力の区分は非接合板のそれと同じとする.

図-7.5に示すように, A6005C-T5の非接合板, 端部接合板, 中間接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係はA6061-T6のそれとほぼ一致するため, A6061-T6と同じ区分とする. A6005C-T5の増厚中間接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係はA6061-T6の増厚中間接合板のそれより下側に位置しているが, A6005C-T5の非接合板の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係を下回ることはない. したがって, A6005C-T5の増厚中間接合板もA6061-T6と同じ区分とする.

A5083-O板の場合, 端部接合板においては, 図-8.1に示すように, 板幅が $b=100\text{mm}$ の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が最も低い. 中間接合板においては, 図-8.3に示すように, $b=300$ の板幅に対して, $c=100\text{mm}$ の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ が最も低い. さらに, 図-8.4に示すように, $c=100\text{mm}$ に対して, 板幅が $b=200\text{mm}$, 300mm , 400mm の $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ はほぼ同じである. $b=100\text{mm}$ の端部接合板の耐荷力と $b=300\text{mm}$ で $c=100\text{mm}$ の中間接合板の耐荷力の比較を図-9.3に示す. 両者はお互いに近い値を示すが, 前者の値が後者の値より低い. したがって, $b=100\text{mm}$ の端部接合板のFEM解析値をA5083-Oの耐荷力曲線の作成に用いる.

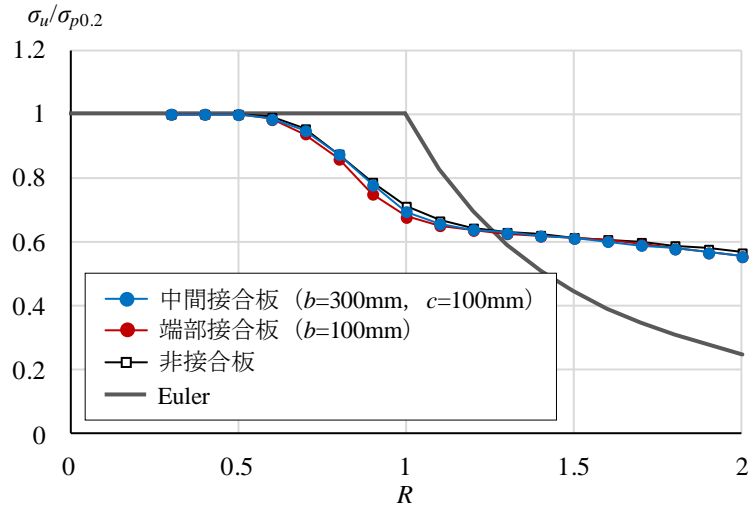
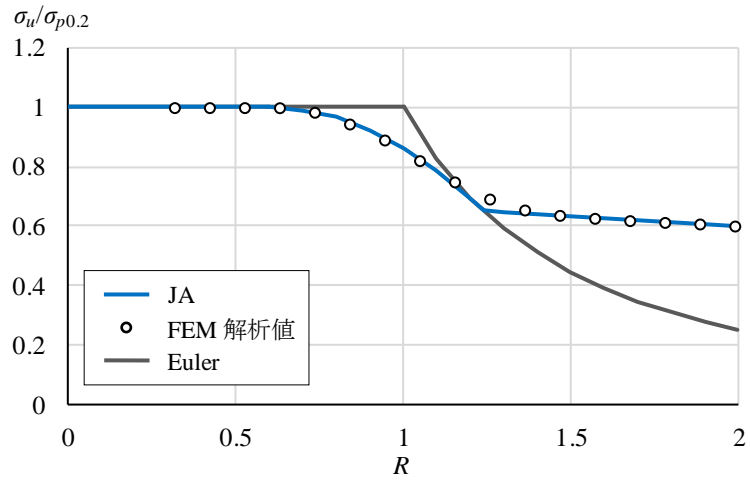
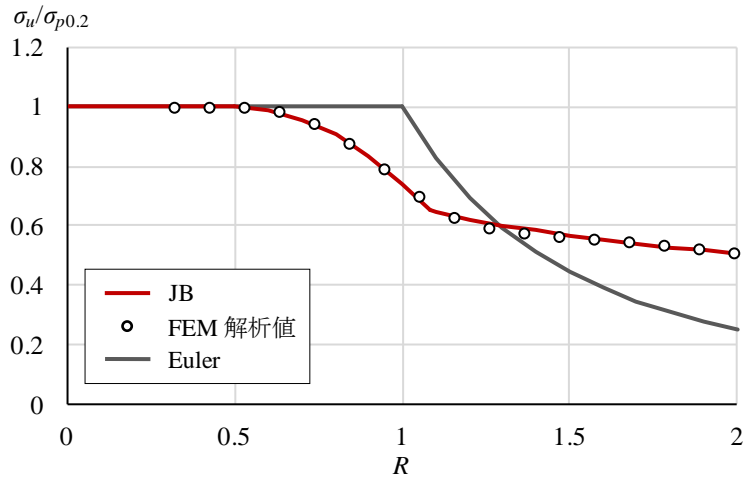


図-9.3 $b=100\text{mm}$ の端部接合板の耐荷力と $b=300\text{mm}$ で $c=100\text{mm}$ の中間接合板の耐荷力の比較 (A5083-O)

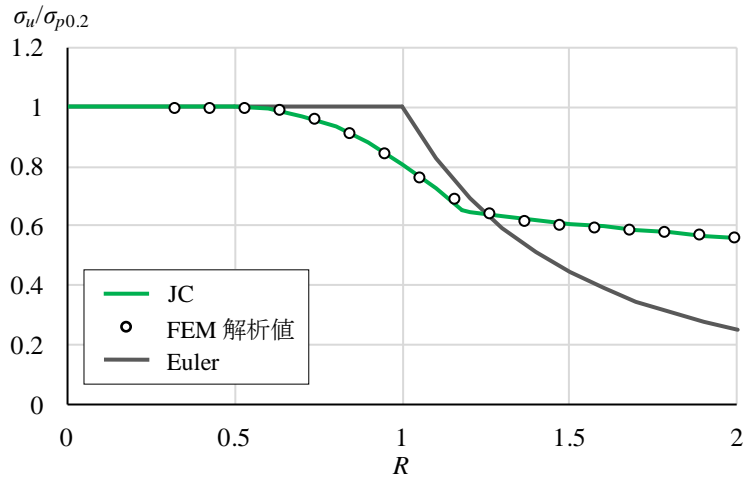
各強度区分に対して、式(9.1)が与える耐荷力曲線と FEM 解析値との比較を図-9.4 に示す。式(9.1)が与える耐荷力曲線は FEM 解析値にほぼ一致している。



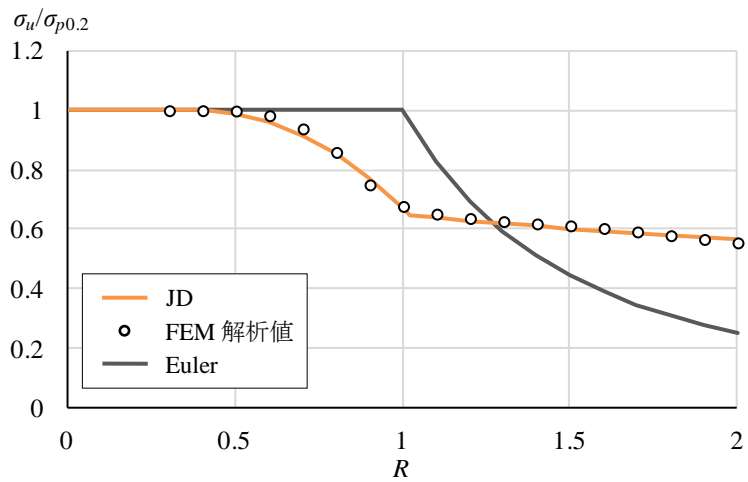
(a) JA



(b) JB



(c) JC



(d) JD

図-9.4 FEM 解析値との比較

9.2 Eurocode 9 の耐荷力曲線との比較

Eurocode 9¹⁹⁾においては、自由突出板に対して次の耐荷力曲線が規定されている。

$$\frac{\sigma}{\sigma_{p0.2}} = \begin{cases} 1 & (0 \leq R \leq R_{1.0}) \\ \frac{Q_1}{R} - \frac{Q_2}{R^2} & (R_{1.0} \leq R) \end{cases} \quad (9.2)$$

ここに、 Q_1 、 Q_2 ：定数

耐荷力曲線の区分、ならびに Q_1 、 Q_2 、 $R_{1.0}$ の値を表-9.2 に示す。

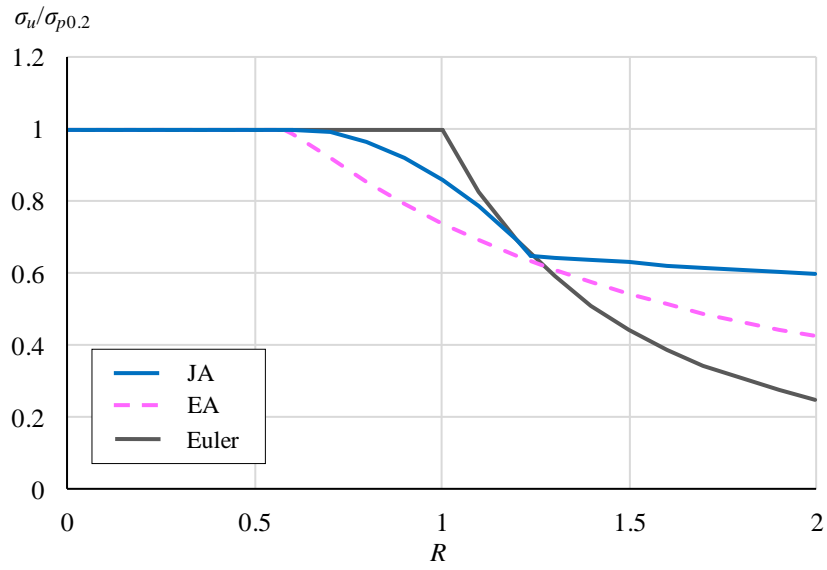
表-9.2 Eurocode 9 の耐荷力曲線の区分、ならびに Q_1 、 Q_2 、 $R_{1.0}$ の値

| 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合金 |
|------|-------------|--------------|
| 非接合板 | EA | EB |
| 接合板 | EB | EC |

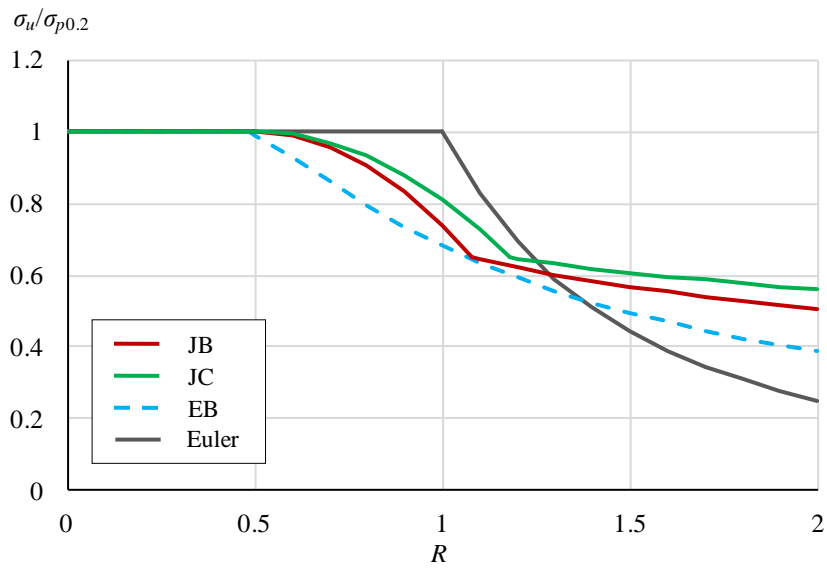
| 記号 | Q_1 | Q_2 | $R_{1.0}$ |
|----|-------|-------|-----------|
| EA | 0.964 | 0.223 | 0.579 |
| EB | 0.868 | 0.186 | 0.482 |
| EC | 0.771 | 0.149 | 0.386 |

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 の耐荷力曲線と式(9.1)が与える耐荷力曲線との比較を図-9.5 に示す。図-9.5(a)に示すように、非接合板に対して、式(9.1)が与える耐荷力曲線 JA は、Eurocode 9 の耐荷力曲線 EA より高い。Eurocode 9 では、MIG 溶接による端部接合板のみ耐荷力曲線が規定されており、中間接合板と増厚中間接合板に対しては規定がない。図-9.5(b)に示すように、本研究では、板幅の大きさに依存して耐荷力を JB と JC に区分しているが、Eurocode 9 では板幅の大きさに依存せず一つの耐荷力曲線である。耐荷力曲線 JB と JC は Eurocode 9 の耐荷力曲線 EB より高い。

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 の耐荷力曲線と式(9.1)が与える耐荷力曲線との比較を図-9.6 に示す。本研究では、非熱処理アルミニウム合金に対して非接合板と接合板の耐荷力を区別せず、一つの耐荷力曲線で与えているが、Eurocode 9 では、非接合板と接合板の耐荷力を区別して、二つの耐荷力曲線を与えている。式(9.1)が与える耐荷力曲線 JD は、 R が 1.0 付近で、耐荷力曲線 EB よりも低くなるが、それ以外の領域では、耐荷力曲線 JD は耐荷力曲線 EB より高い。式(9.1)が与える耐荷力曲線 JD は耐荷力曲線 EC より常に高い。



(a) 非接合板



(b) 接合板

図-9.5 Eurocode 9 との比較 (熱処理アルミニウム合金)

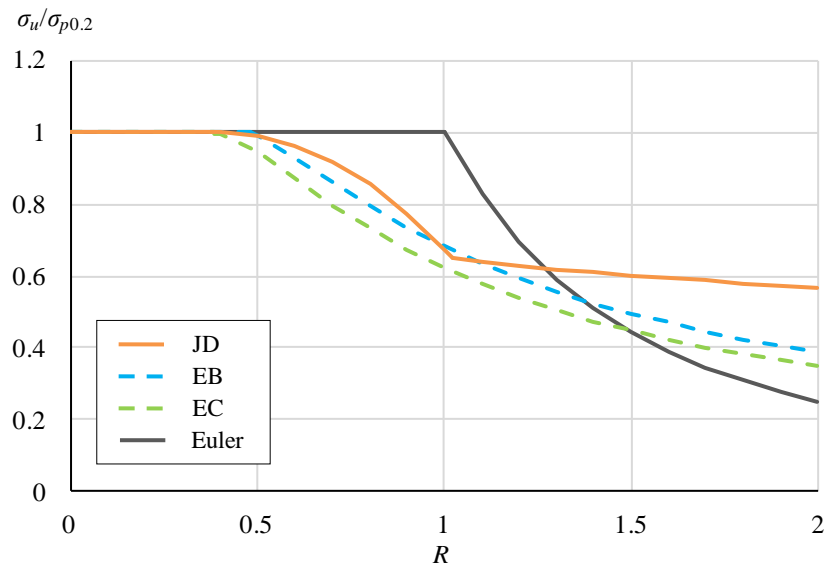


図-9.6 Eurocode 9 との比較 (非熱処理アルミニウム合金)

第 10 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) 縦横比 a/b による耐荷力の変動は、式(4.7)で定義される幅厚比パラメータ R で表す方が、式(4.5)で定義される幅厚比パラメータ R_k で表すより小さい。縦横比 a/b が 5 に対する耐荷力は、 R の全領域でほぼ下限値を与える。
- (2) R が 0.6 から 0.8 の範囲で、 $m=1$ に対する耐荷力が他のモード数に対するそれより幾分高くなる。 R が 0.8 以上の範囲では、モード数が大きくなるに従って、耐荷力が上昇する。 R が 0.8 から 1.3 の範囲において、最大初期たわみが小さくなるに従って、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ (4.1 節参照) が上昇するが、 R が 1.3 以上の範囲では、最大初期たわみの大きさは耐荷力に影響しない。
- (3) アルミニウム合金 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、板幅が大きくなるほど増加し、非接合板のそれに近づく。残留応力の影響はほとんどない。
- (4) アルミニウム合金 A6061-T6 の中間接合板の、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ で表された耐荷力は、接合中心が自由辺に近づくに従って上昇する。これは、接合部に存在する引張残留応力が、荷重作用によって生じる圧縮応力を相殺するためと考えられる。
- (5) アルミニウム合金 A6061-T6 の増厚中間接合板の、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ で表された耐荷力は、非接合板のそれより高い。接合中心の位置が自由辺に近づくほど増加する。接合中心の位置が自由辺に近づくほど、残留応力の影響により、耐荷力が上昇する。
- (6) 非接合板、端部接合板、中間接合板においては、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ 表示の、A6005C-T5 板と A6061-T6 板の耐荷力はほぼ等しい。増厚中間接合板では、A6005C-T5 板の増厚部の厚さが、A6061-T6 板のそれより小さいため、前者の増厚部の断面二次モーメントは後者のそれより小さい。したがって、A6005C-T5 の増厚中間接合板の面外変位が A6061-T6 のそれより大きくなるため、前者の、 $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ で表された耐荷力が後者のそれより小さくなる。
- (7) A5083-O の端部接合板の耐荷力は、板幅が小さいとき、残留応力の影響により、非接合板のそれよりわずかに低下する。A5083-O の中間接合板の耐荷力は、残留応力の影響により、接合中心が自由辺に近づくに従って上昇する。
- (8) 本研究の成果に基づいて、次の耐荷力曲線を提案した。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{p0.2}} = \begin{cases} 1 & (R \leq R_{1.0}) \\ 1 - 0.35 \left(\frac{R - R_{1.0}}{R_{0.65} - R_{1.0}} \right)^2 & (R_{1.0} \leq R \leq R_{0.65}) \\ 0.65 \left(\frac{R_{0.65}}{R} \right)^m & (R_{0.65} \leq R \leq 2) \end{cases}$$

ここに、 $R_{1.0}$: 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

$R_{0.65}$: $\sigma_u/\sigma_{p0.2}=0.65$ に対する幅厚比パラメータの値

m : 定数

耐力曲線の区分と $R_{1.0}$, $R_{0.65}$, m の値を次表に表す。

耐力曲線の区分と $R_{1.0}$, $R_{0.65}$, m の値

| アルミニウム合金 | | A6061-T6 A6005C-T5 | A5083-O |
|--|-----------------------|-----------------------|---------|
| 非接合板 増厚中間接合板* ($200 \leq b$, $100 \leq c < b$) | | JA | JD |
| 端部接合板 | $100 \leq b \leq 200$ | JB | |
| | $200 \leq b$ | JC | |
| 中間接合板 ($200 \leq b$, $100 \leq c < b$) | | JC | |

b : 板幅 (mm)

c : 支持辺から接合中心までの距離 (mm)

* : A5083-O に増厚中間接合板は適用されない。

| | $R_{1.0}$ | $R_{0.65}$ | m |
|----|-----------|------------|------|
| JA | 0.6 | 1.24 | 0.16 |
| JB | 0.5 | 1.08 | 0.41 |
| JC | 0.5 | 1.18 | 0.28 |
| JD | 0.4 | 1.02 | 0.2 |

- (9) 本研究で提案された耐力曲線は Eurocode 9¹⁹⁾で規定される耐力曲線より高い。熱処理アルミニウム合金 (6000 系アルミニウム合金) の端部接合板に対して、本研究では、板幅の大きさに依存して耐力力を区分して、二つの耐力曲線を与えているが、Eurocode 9 では板幅の大きさに依存せず、一つの耐力曲線を与えている。非熱処理アルミニウム合金 (5000 系アルミニウム合金) に対して、本研究では、非接合板と接合板の耐力力を区別せず、一つの耐力曲線で与えているが、Eurocode 9 では、非接合板と接合板の耐力力を区別して、二つの耐力曲線を与えている。

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) 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疲労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.
- 3) 日本アルミニウム協会 土木構造物委員会：道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋一設計・製作・施工ガイドライン，2011.
- 4) アルミニウム橋研究会：蒲原ケミカル橋. <http://alst.jp/str/bridge/kanbara.htm>
- 5) 野中哲也，宇佐美勉：上路式鋼アーチ橋のRC床版をアルミニウム床版に取り替えることによる耐震性の向上，アルミニウム合金材の土木構造物への活用に関するシンポジウム，土木学会，鋼構造委員会アルミニウム構造小委員会，pp.138-147，2012.
- 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) 日本アルミニウム協会 土木構造物委員会：アルミニウム合金土木構造物の摩擦撹拌接合部の品質検査ガイドライン，2010.
- 8) 大倉一郎，北村幸嗣，赤崎圭輔，卯瀧高久，ビッグ・ラズロ・ゲルゲリ，三河克己：新しいアルミニウム合金製補剛桁の提案，構造工学論文集，Vol.51A，pp.203-210，2005.
- 9) 西森文子，大倉一郎：座屈強度と終局強度を考慮した突起付きアルミニウム合金板の断面形状，構造工学論文集，Vol.59A，pp.199-207，2013.
- 10) 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.
- 11) 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
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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 接合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.
- 15) 日本マーク：MARC，K6，2005.
- 16) Column Research Committee of Japan: Handbook of Structural Stability, Corona Publishing Company, Ltd., Tokyo, Japan, Part III Plates, 1971.
- 17) 土木学会 鋼構造委員会 座屈設計ガイドライン小委員会：座屈設計ガイドライン [2005年改訂版]，土木学会，丸善，2005.
- 18) 大倉一郎，寺川勝大：面内せん断を受けるアルミニウム長方形板の耐荷力，土木学会論文

集 A1 (構造・地震工学) , Vol.69, No.3, pp.491-504, 2013.

- 19) Eurocode 9 : Design of Aluminum Structures - Part 1-1 : General rules - General rules and rules for buildings, 1999.

付録A 図-5.1 と 5.2 の数値データ

| R_k | $a/b=1$ | | $a/b=2$ | | $a/b=3$ | | $a/b=4$ | |
|-------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|
| | R | $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ | R | $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ | R | $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ | R | $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ |
| 0.3 | 0.549 | 0.990 | 0.378 | 1.000 | 0.337 | 1.000 | 0.321 | 1.000 |
| 0.4 | 0.732 | 0.966 | 0.504 | 1.000 | 0.449 | 1.000 | 0.428 | 1.000 |
| 0.5 | 0.916 | 0.928 | 0.630 | 0.988 | 0.562 | 0.999 | 0.536 | 1.000 |
| 0.6 | 1.099 | 0.880 | 0.756 | 0.960 | 0.674 | 0.986 | 0.643 | 0.995 |
| 0.7 | 1.282 | 0.829 | 0.882 | 0.918 | 0.786 | 0.954 | 0.750 | 0.973 |
| 0.8 | 1.465 | 0.776 | 1.008 | 0.867 | 0.899 | 0.908 | 0.857 | 0.930 |
| 0.9 | 1.648 | 0.725 | 1.134 | 0.811 | 1.011 | 0.851 | 0.964 | 0.875 |
| 1 | 1.831 | 0.678 | 1.260 | 0.756 | 1.123 | 0.788 | 1.071 | 0.807 |
| 1.1 | 2.014 | 0.636 | 1.386 | 0.710 | 1.235 | 0.730 | 1.178 | 0.741 |
| 1.2 | 2.197 | 0.598 | 1.512 | 0.676 | 1.348 | 0.688 | 1.285 | 0.690 |
| 1.3 | 2.380 | 0.565 | 1.638 | 0.650 | 1.460 | 0.663 | 1.392 | 0.659 |
| 1.4 | 2.564 | 0.535 | 1.764 | 0.629 | 1.572 | 0.648 | 1.499 | 0.643 |
| 1.5 | 2.747 | 0.509 | 1.890 | 0.611 | 1.685 | 0.635 | 1.607 | 0.632 |
| 1.6 | 2.930 | 0.486 | 2.016 | 0.595 | 1.797 | 0.624 | 1.714 | 0.623 |
| 1.7 | 3.113 | 0.464 | 2.142 | 0.581 | 1.909 | 0.612 | 1.821 | 0.615 |
| 1.8 | 3.296 | 0.446 | 2.268 | 0.568 | 2.022 | 0.601 | 1.928 | 0.607 |
| 1.9 | 3.479 | 0.429 | 2.394 | 0.556 | 2.134 | 0.590 | 2.035 | 0.597 |
| 2 | 3.662 | 0.413 | 2.521 | 0.545 | 2.246 | 0.578 | 2.142 | 0.587 |

| R_k | $a/b=5$ | | $a/b=6$ | | $a/b=8$ | | $a/b=10$ | |
|-------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|----------|--------------------------|
| | R | $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ | R | $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ | R | $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ | R | $\sigma_u/\sigma_{p0.2}$ |
| 0.3 | 0.314 | 1.000 | 0.310 | 1.000 | 0.305 | 1.000 | 0.304 | 1.000 |
| 0.4 | 0.418 | 1.000 | 0.413 | 1.000 | 0.407 | 1.000 | 0.405 | 1.000 |
| 0.5 | 0.523 | 1.004 | 0.516 | 1.000 | 0.509 | 1.000 | 0.506 | 1.000 |
| 0.6 | 0.628 | 1.000 | 0.619 | 1.000 | 0.611 | 1.000 | 0.607 | 1.000 |
| 0.7 | 0.732 | 0.984 | 0.723 | 0.991 | 0.713 | 0.997 | 0.708 | 1.000 |
| 0.8 | 0.837 | 0.945 | 0.826 | 0.955 | 0.815 | 0.969 | 0.809 | 0.977 |
| 0.9 | 0.941 | 0.891 | 0.929 | 0.902 | 0.916 | 0.918 | 0.911 | 0.929 |
| 1 | 1.046 | 0.822 | 1.032 | 0.833 | 1.018 | 0.849 | 1.012 | 0.859 |
| 1.1 | 1.151 | 0.750 | 1.135 | 0.757 | 1.120 | 0.768 | 1.113 | 0.782 |
| 1.2 | 1.255 | 0.692 | 1.239 | 0.695 | 1.222 | 0.699 | 1.214 | 0.705 |
| 1.3 | 1.360 | 0.655 | 1.342 | 0.653 | 1.324 | 0.653 | 1.315 | 0.655 |
| 1.4 | 1.464 | 0.637 | 1.445 | 0.633 | 1.426 | 0.629 | 1.416 | 0.627 |
| 1.5 | 1.569 | 0.627 | 1.548 | 0.624 | 1.527 | 0.620 | 1.518 | 0.618 |
| 1.6 | 1.674 | 0.619 | 1.651 | 0.617 | 1.629 | 0.613 | 1.619 | 0.612 |
| 1.7 | 1.778 | 0.613 | 1.755 | 0.611 | 1.731 | 0.609 | 1.720 | 0.608 |
| 1.8 | 1.883 | 0.608 | 1.858 | 0.607 | 1.833 | 0.605 | 1.821 | 0.605 |
| 1.9 | 1.987 | 0.601 | 1.961 | 0.602 | 1.935 | 0.602 | 1.922 | 0.602 |
| 2 | 2.092 | 0.592 | 2.064 | 0.594 | 2.036 | 0.597 | 2.023 | 0.598 |

付録 B 初期たわみ形状が耐荷力に与える影響

$m=1$ の初期たわみ形状に対して、板幅方向の要素分割数が 8 と 12 に対する耐荷力の比較を図-B.1 に示す。

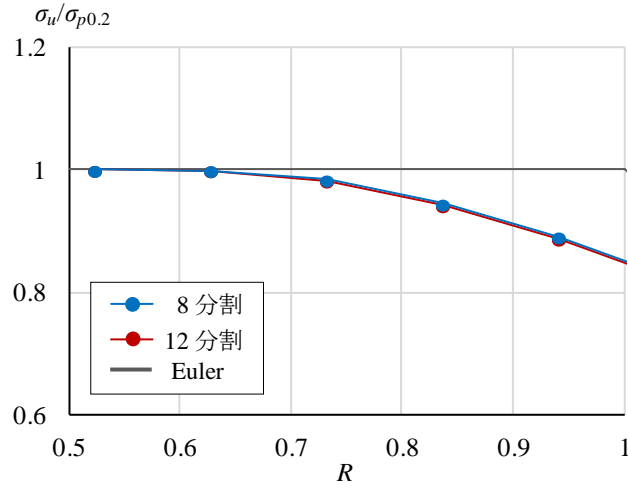
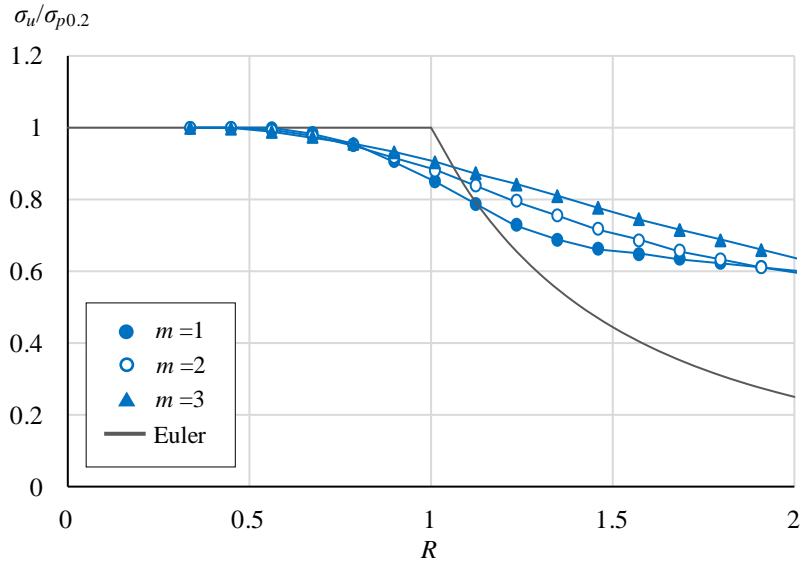


図-B.1 板幅方向の要素分割数が 8 と 12 に対する耐荷力の比較

縦横比 a/b が 3 と 4 の長方形板に対する $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係を図-B.2 に示す。



(a) $a/b=3$

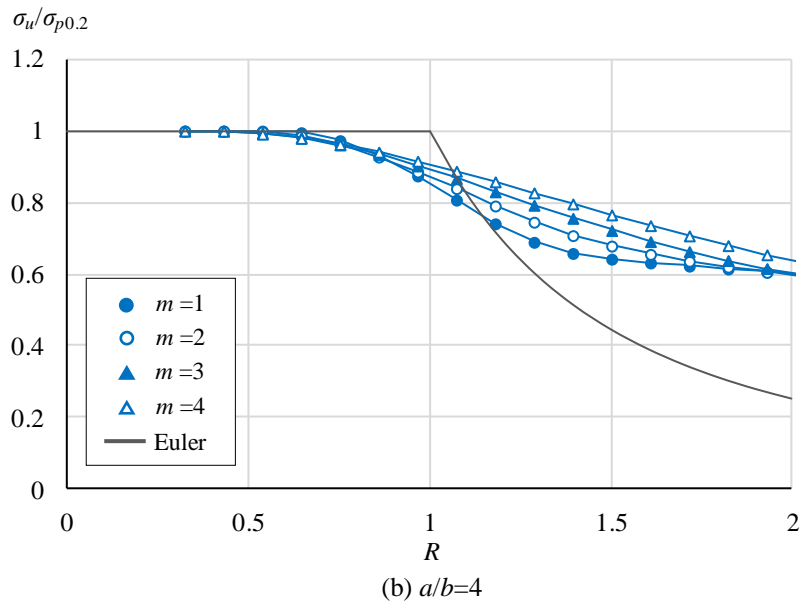


図-B.2 縦横比 a/b が 3 と 4 の長方形板に対する $\sigma_u/\sigma_{p0.2}-R$ 関係

付録C 第7章と第8章の各図の数値データ

図-7.1

| R | $\sigma_{cr}/\sigma_{0.2}$ | | | | | |
|-------|----------------------------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | b=100mm | | b=200mm | | b=300mm | |
| | 残留応力 | | 残留応力 | | 残留応力 | |
| | なし | あり | なし | あり | なし | あり |
| 0.314 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.418 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.523 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.628 | 0.985 | 0.986 | 0.995 | 0.995 | 0.997 | 0.997 |
| 0.732 | 0.945 | 0.945 | 0.966 | 0.967 | 0.973 | 0.973 |
| 0.837 | 0.886 | 0.879 | 0.918 | 0.917 | 0.927 | 0.927 |
| 0.941 | 0.801 | 0.793 | 0.851 | 0.848 | 0.865 | 0.864 |
| 1.046 | 0.712 | 0.700 | 0.769 | 0.765 | 0.787 | 0.785 |
| 1.151 | 0.642 | 0.629 | 0.695 | 0.691 | 0.713 | 0.711 |
| 1.255 | 0.598 | 0.594 | 0.644 | 0.641 | 0.660 | 0.658 |
| 1.360 | 0.578 | 0.577 | 0.616 | 0.615 | 0.629 | 0.629 |
| 1.464 | 0.566 | 0.565 | 0.602 | 0.602 | 0.614 | 0.614 |
| 1.569 | 0.557 | 0.556 | 0.593 | 0.592 | 0.604 | 0.604 |
| 1.674 | 0.547 | 0.547 | 0.585 | 0.585 | 0.597 | 0.597 |
| 1.778 | 0.535 | 0.535 | 0.578 | 0.578 | 0.591 | 0.590 |
| 1.883 | 0.523 | 0.523 | 0.568 | 0.568 | 0.583 | 0.583 |
| 1.987 | 0.509 | 0.510 | 0.558 | 0.558 | 0.573 | 0.573 |
| 2.092 | 0.496 | 0.496 | 0.546 | 0.546 | 0.562 | 0.562 |

図-7.2

| R | $\sigma_{cr}/\sigma_{0.2}$ | | | | | |
|-------|----------------------------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | c=100mm | | c=200mm | | c=250mm | |
| | 残留応力 | | 残留応力 | | 残留応力 | |
| | なし | あり | なし | あり | なし | あり |
| 0.314 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.418 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.523 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.628 | 0.994 | 0.994 | 0.998 | 0.998 | 1.000 | 1.000 |
| 0.732 | 0.964 | 0.965 | 0.979 | 0.981 | 0.989 | 0.990 |
| 0.837 | 0.915 | 0.916 | 0.939 | 0.941 | 0.956 | 0.959 |
| 0.941 | 0.847 | 0.848 | 0.885 | 0.888 | 0.909 | 0.914 |
| 1.046 | 0.766 | 0.767 | 0.814 | 0.822 | 0.845 | 0.857 |
| 1.151 | 0.694 | 0.693 | 0.745 | 0.754 | 0.775 | 0.795 |
| 1.255 | 0.645 | 0.643 | 0.695 | 0.699 | 0.719 | 0.740 |
| 1.360 | 0.620 | 0.619 | 0.668 | 0.667 | 0.687 | 0.700 |
| 1.464 | 0.607 | 0.606 | 0.656 | 0.654 | 0.674 | 0.677 |
| 1.569 | 0.598 | 0.597 | 0.648 | 0.647 | 0.666 | 0.668 |
| 1.674 | 0.590 | 0.590 | 0.642 | 0.641 | 0.660 | 0.661 |
| 1.778 | 0.583 | 0.583 | 0.637 | 0.636 | 0.654 | 0.656 |
| 1.883 | 0.574 | 0.574 | 0.631 | 0.629 | 0.647 | 0.651 |
| 1.987 | 0.564 | 0.564 | 0.623 | 0.622 | 0.637 | 0.643 |
| 2.092 | 0.554 | 0.554 | 0.614 | 0.613 | 0.626 | 0.633 |

图-7.3

| R | $\sigma_{cr}/\sigma_{0.2}$ | |
|-------|----------------------------|---------|
| | b=200mm | b=400mm |
| 0.314 | 1.000 | 1.000 |
| 0.418 | 1.000 | 1.000 |
| 0.523 | 1.000 | 1.000 |
| 0.628 | 0.993 | 0.995 |
| 0.732 | 0.963 | 0.968 |
| 0.837 | 0.916 | 0.920 |
| 0.941 | 0.849 | 0.855 |
| 1.046 | 0.770 | 0.775 |
| 1.151 | 0.703 | 0.702 |
| 1.255 | 0.658 | 0.651 |
| 1.360 | 0.635 | 0.623 |
| 1.464 | 0.624 | 0.609 |
| 1.569 | 0.616 | 0.600 |
| 1.674 | 0.610 | 0.592 |
| 1.778 | 0.604 | 0.585 |
| 1.883 | 0.598 | 0.576 |
| 1.987 | 0.591 | 0.566 |
| 2.092 | 0.583 | 0.555 |

図 7. 4

| R | $\sigma_{cr}/\sigma_{0.2}$ | | | | | |
|-----|----------------------------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | c=100mm | | c=200mm | | c=250mm | |
| | 残留応力 | | 残留応力 | | 残留応力 | |
| | なし | あり | なし | あり | なし | あり |
| 0.3 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.4 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.5 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.6 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.7 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.8 | 0.996 | 0.997 | 0.997 | 0.998 | 0.997 | 0.998 |
| 0.9 | 0.982 | 0.986 | 0.985 | 0.989 | 0.986 | 0.990 |
| 1 | 0.958 | 0.965 | 0.962 | 0.971 | 0.964 | 0.974 |
| 1.1 | 0.928 | 0.934 | 0.933 | 0.945 | 0.935 | 0.950 |
| 1.2 | 0.889 | 0.899 | 0.895 | 0.915 | 0.899 | 0.924 |
| 1.3 | 0.839 | 0.859 | 0.847 | 0.882 | 0.853 | 0.895 |
| 1.4 | 0.780 | 0.809 | 0.793 | 0.845 | 0.802 | 0.863 |
| 1.5 | 0.722 | 0.751 | 0.741 | 0.801 | 0.755 | 0.828 |
| 1.6 | 0.672 | 0.688 | 0.698 | 0.755 | 0.716 | 0.790 |
| 1.7 | 0.636 | 0.634 | 0.668 | 0.708 | 0.687 | 0.753 |
| 1.8 | 0.627 | 0.626 | 0.649 | 0.667 | 0.667 | 0.720 |
| 1.9 | 0.620 | 0.619 | 0.637 | 0.637 | 0.653 | 0.691 |
| 2 | 0.615 | 0.614 | 0.630 | 0.625 | 0.643 | 0.667 |

図-7.5

| R | $\sigma_{cr}/\sigma_{0.2}$ | | | |
|-----|----------------------------|-----------|-----------|-------------|
| | 非接合板 | 端部 接合板 | 中間 接合板 | 増厚中間 接合板 |
| 0.3 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.4 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.5 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.6 | 0.997 | 0.994 | 0.992 | 1.000 |
| 0.7 | 0.979 | 0.970 | 0.965 | 0.995 |
| 0.8 | 0.943 | 0.931 | 0.923 | 0.979 |
| 0.9 | 0.897 | 0.878 | 0.868 | 0.953 |
| 1 | 0.838 | 0.812 | 0.799 | 0.917 |
| 1.1 | 0.771 | 0.742 | 0.729 | 0.871 |
| 1.2 | 0.711 | 0.683 | 0.672 | 0.815 |
| 1.3 | 0.666 | 0.644 | 0.636 | 0.754 |
| 1.4 | 0.643 | 0.625 | 0.619 | 0.699 |
| 1.5 | 0.631 | 0.614 | 0.609 | 0.656 |
| 1.6 | 0.623 | 0.605 | 0.601 | 0.636 |
| 1.7 | 0.616 | 0.599 | 0.594 | 0.626 |
| 1.8 | 0.610 | 0.592 | 0.588 | 0.620 |
| 1.9 | 0.604 | 0.584 | 0.579 | 0.614 |
| 2 | 0.596 | 0.575 | 0.570 | 0.609 |

图-8.1

| R | $\sigma_{cr}/\sigma_{0.2}$ | | | |
|-----|----------------------------|---------|---------|---------|
| | 非接合板 | 端部接合板 | | |
| | | b=100mm | b=200mm | b=300mm |
| 0.3 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.4 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.5 | 1.000 | 0.999 | 0.999 | 0.999 |
| 0.6 | 0.990 | 0.983 | 0.985 | 0.986 |
| 0.7 | 0.955 | 0.939 | 0.949 | 0.951 |
| 0.8 | 0.875 | 0.860 | 0.870 | 0.873 |
| 0.9 | 0.788 | 0.750 | 0.774 | 0.780 |
| 1.0 | 0.713 | 0.678 | 0.696 | 0.703 |
| 1.1 | 0.667 | 0.652 | 0.660 | 0.663 |
| 1.2 | 0.644 | 0.637 | 0.641 | 0.643 |
| 1.3 | 0.631 | 0.627 | 0.630 | 0.630 |
| 1.4 | 0.622 | 0.619 | 0.621 | 0.621 |
| 1.5 | 0.615 | 0.613 | 0.614 | 0.614 |
| 1.6 | 0.609 | 0.604 | 0.607 | 0.608 |
| 1.7 | 0.600 | 0.592 | 0.597 | 0.598 |
| 1.8 | 0.589 | 0.579 | 0.586 | 0.587 |
| 1.9 | 0.578 | 0.567 | 0.574 | 0.575 |
| 2.0 | 0.567 | 0.555 | 0.562 | 0.564 |

図-8.3 と 8.4

| R | $\sigma_{cr}/\sigma_{0.2}$ | | | | |
|-----|----------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | b=200mm | b=300mm | | | b=400mm |
| | c=100mm | c=100mm | c=200mm | c=300mm | c=100mm |
| 0.3 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.4 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| 0.5 | 0.999 | 0.999 | 1.000 | 0.999 | 0.999 |
| 0.6 | 0.984 | 0.985 | 0.985 | 0.985 | 0.985 |
| 0.7 | 0.945 | 0.948 | 0.955 | 0.960 | 0.950 |
| 0.8 | 0.885 | 0.875 | 0.898 | 0.913 | 0.873 |
| 0.9 | 0.795 | 0.779 | 0.816 | 0.843 | 0.778 |
| 1.0 | 0.704 | 0.696 | 0.736 | 0.774 | 0.698 |
| 1.1 | 0.652 | 0.657 | 0.673 | 0.715 | 0.660 |
| 1.2 | 0.635 | 0.640 | 0.639 | 0.672 | 0.641 |
| 1.3 | 0.624 | 0.628 | 0.625 | 0.645 | 0.629 |
| 1.4 | 0.616 | 0.620 | 0.616 | 0.629 | 0.620 |
| 1.5 | 0.606 | 0.612 | 0.609 | 0.620 | 0.613 |
| 1.6 | 0.594 | 0.602 | 0.601 | 0.613 | 0.605 |
| 1.7 | 0.581 | 0.590 | 0.591 | 0.608 | 0.594 |
| 1.8 | 0.569 | 0.579 | 0.581 | 0.602 | 0.582 |
| 1.9 | 0.556 | 0.567 | 0.570 | 0.594 | 0.571 |
| 2.0 | 0.546 | 0.555 | 0.560 | 0.584 | 0.559 |