

# アルミニウム合金桁の横倒れ耐荷力

ALST 研究レポート 36

2014 年 3 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、有限要素法による弾塑性有限変位解析によって、桁の横倒れ耐荷力が明らかにされ、その算定式が与えられる。

## 目次

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 第 1 章 序論                              | ・・・1  |
| 第 2 章 圧縮を受ける平板部材                      | ・・・3  |
| 第 3 章 FEM による弾塑性有限変位解析                | ・・・6  |
| 第 4 章 耐荷力表示で使用されるパラメータ                | ・・・9  |
| 第 5 章 平板部材の寸法の決定方法                    | ・・・11 |
| 第 6 章 6000 系アルミニウム合金の平板部材の耐荷力         | ・・・12 |
| 6.1 中央接合                              | ・・・12 |
| 6.2 中間接合                              | ・・・13 |
| 6.3 増厚中間接合                            | ・・・14 |
| 6.4 A6061-T6 と A6005C-T5 の平板部材の耐荷力の比較 | ・・・16 |
| 第 7 章 A5083-0 の平板部材の耐荷力               | ・・・19 |
| 第 8 章 耐荷力曲線                           | ・・・21 |
| 8.1 耐荷力曲線の定式化                         | ・・・21 |
| 8.2 ECCS の耐荷力曲線との比較                   | ・・・25 |
| 第 9 章 結論                              | ・・・27 |
| 参考文献                                  | ・・・29 |
| 付録 数値データ                              | ・・・31 |

## 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<sup>1)</sup>。さらに、道路橋用アルミニウム床版が開発され<sup>2),3)</sup>、その試験施工が実施されている<sup>4)</sup>。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<sup>5)</sup>。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)<sup>1),6),7)</sup>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<sup>8)</sup>。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。さらに、突起は水平方向に連続するので、強度部材として曲げ応力を分担させることができる。

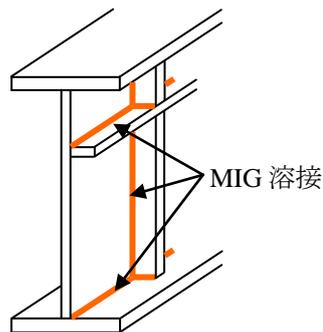


図-1.1 従来の桁

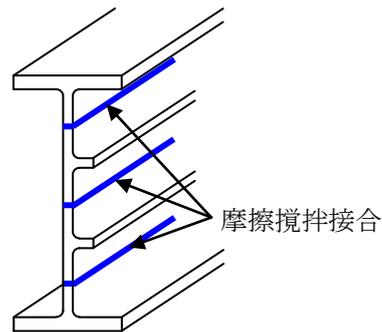


図-1.2 突起付きアルミニウム合金桁

図-1.2 に示す、突起付きアルミニウム合金桁の実用化を目指して、圧縮を受ける両縁支持板<sup>9)</sup>、曲げを受ける両縁支持板<sup>10)</sup>およびせん断を受ける 4 辺単純支持板<sup>11)</sup>の耐荷力が有限要素法による弾塑性有限変位解析によって調べられた。さらに、摩擦攪拌接合を用いて、突起付きアルミニウム合金板が試作され、その初期たわみと接合残留応力が測定された<sup>12)</sup>。

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<sup>13)</sup>。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<sup>14)</sup>。

本研究では、アルミニウム合金桁の横倒れ耐荷力を明らかにし、その算定式を与えることを目的とする。

## 第2章 圧縮を受ける平板部材

曲げを受ける突起付き桁を図-2.1 に示す。ウェブが降伏モーメントを維持するとき、曲げを受ける桁の耐荷力は、圧縮フランジの横倒れ耐荷力で与えられる。そして、圧縮フランジの横倒れ耐荷力は、図-2.2 に示すように、破線で示される、圧縮フランジとウェブが交差する位置で、鉛直方向の変位が拘束された、幅が  $B_f$  で、厚さが  $t_f$  の平板部材が圧縮を受けて水平方向に座屈するときの耐荷力として与えられる。

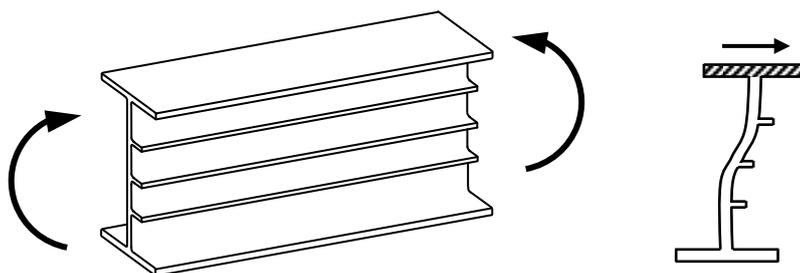


図-2.1 圧縮フランジの横倒れ座屈

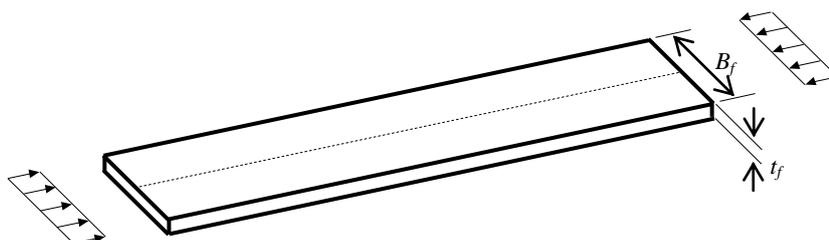


図-2.2 圧縮を受ける平板部材

文献 14)に示す、I型断面の桁のフランジの製作方法を考慮して、図-2.3 に示す平板部材を扱う。図-2.3(a)は、T型断面の押出型材を使用することによって、フランジとウェブとの間に接合がない場合である。現在、我国で製造できるT型断面の押出型材の幅は約250mmである<sup>15)</sup>。したがって、非接合の平板部材の最大幅は約250mmである。

フランジ幅が約250mmを超える場合には、図-2.3(b), (c), (d)に示す接合が考えられる。図-2.3(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に対応する。6000系の熱処理アルミニウム合金の場合、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<sup>6),16)</sup>。したがって、ウェブの板厚を無視すると、平板部材の中央の50mmの範囲が強度低下を起こす。

図-2.3(c)は、摩擦攪拌接合によって、T型断面の押出型材の突出縁に平板を突合せ接合することにより、I型断面の桁のフランジを製作する場合に対応する。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<sup>6),16)</sup>。

6000系の熱処理アルミニウム合金に対して、図-2.3(d)は、強度低下を起こす範囲の板厚を厚くすることにより、接合部の強度低下が補われた平板部材である。押出型材の製造においては、型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、母材と接合部の厚さ

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

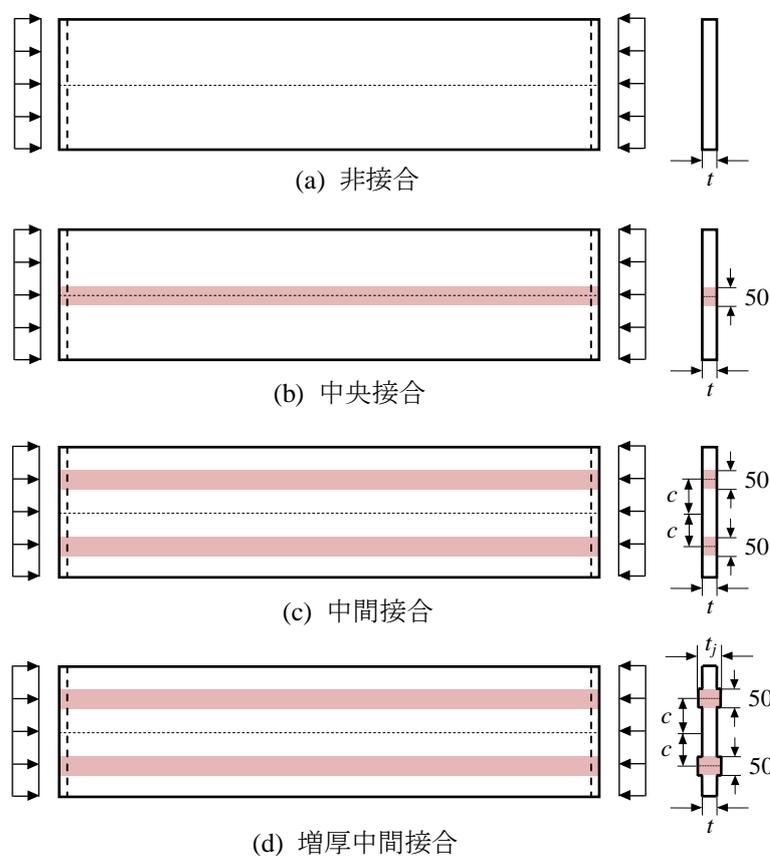


図-2.3 平板部材

図-2.4を参照して、平板部材の水平方向（y軸方向）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。

$$v_0 = \frac{l}{1000} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (2.2)$$

ここに、 $v_0$  : 平板部材の水平方向の初期たわみ

$l$  : 平板部材の長さ

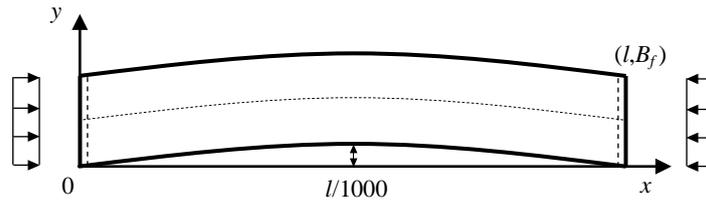


図-2.4 初期たわみ

式(2.2)の  $l/1000$  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）<sup>17)</sup>（以後、JAA 指針と呼ぶ）で規定される、圧縮部材に許容される最大初期たわみである。

摩擦撹拌接合および 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<sup>16)</sup>。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<sup>18)</sup>。これらを考慮して、平板部材に生じる残留応力分布に対する仮定を図-2.5 に示す。

図-2.5(a)の中央接合の場合、平板部材の中央からそれぞれ 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、それ以外の領域に、 $50\sigma_{j0.2}/(B_f-50)$  の圧縮残留応力を与える ( $B_f$  の単位は mm)。図-2.5(b)の中間接合の場合、平板部材の中央から  $c$  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  $100\sigma_{j0.2}/(B_f-100)$  の圧縮残留応力を与える ( $B_f$  の単位は mm)。図-2.5(c)の増厚中間接合の場合、平板部材の中央から  $c$  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  $100\sigma_{j0.2}/(B_f-100)$  の圧縮残留応力を与える ( $B_f$  の単位は mm)。

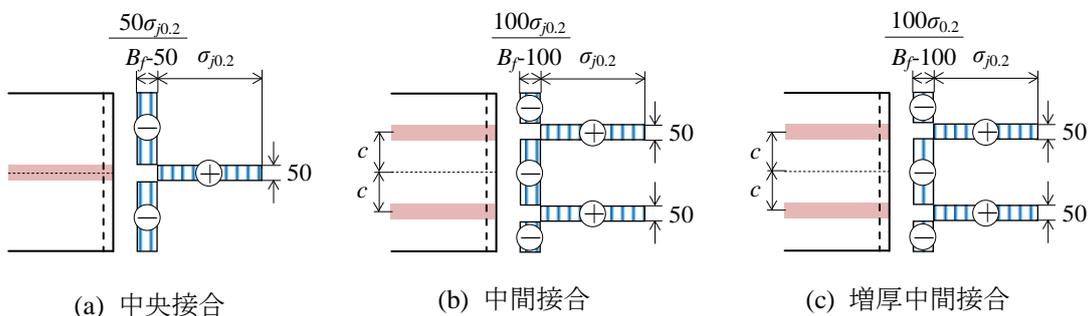


図-2.5 残留応力分布

### 第3章 FEMによる弾塑性有限変位解析

圧縮を受ける平板部材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<sup>16)</sup>。

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

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

ここに、 $\varepsilon$ と $\sigma$  : ひずみと応力

$E$  : ヤング率 (=70GPa)

$\sigma_{0.2}$ 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 JAA 指針<sup>17)</sup>で規定される値を用いる。JAA 指針で規定される接合部の 0.2%耐力は、MIG 溶接に対するものである。摩擦攪拌接合は MIG 溶接ほど入熱量が大きくないので、摩擦攪拌接合部の 0.2%耐力は MIG 溶接部の 0.2%耐力より高いと考えられる。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<sup>16)</sup>。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。

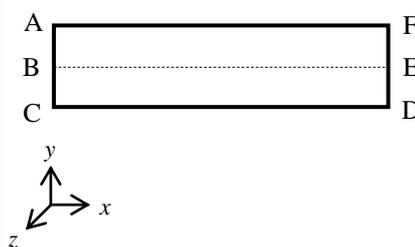
表-3.1 0.2%耐力とひずみ硬化パラメータの値

| 材料        | 母材                      |      | 接合部                      |       |                          |       |
|-----------|-------------------------|------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|
|           |                         |      | MIG 溶接                   |       | 摩擦攪拌接合                   |       |
|           | $\sigma_{0.2}$<br>(MPa) | $n$  | $\sigma_{j0.2}$<br>(MPa) | $n_j$ | $\sigma_{j0.2}$<br>(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   |

弾塑性有限変位解析には汎用有限要素解析プログラム MARC<sup>19)</sup>を使用する。後の図-3.1 に示すように、圧縮を受ける平板部材を 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) で要素分割する。境界条件を表-3.1 に示す。辺 AC と辺 BE の  $z$  軸方向の変位を

拘束する。辺 DF に対称性の境界条件を与える。辺 AC に剛棒を設け、点 B の y 軸方向の変位を拘束する。さらに、点 B を x 軸方向に強制変位させることによって、平板部材に圧縮荷重を与える。3次元弾性梁要素 (MARC における要素番号 52) 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。平板部材の 8 節点アイソパラメトリックシェル要素の節点と 3次元弾性梁要素の節点を共有させる。点 B の位置の節点と辺 AC 上の各節点をタイイングし、点 B の z 軸回りの回転角と辺 AC 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。

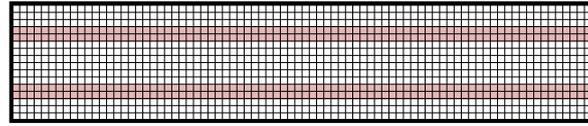
表-3.1 境界条件

|      | 変位   |      |      | 回転    |       |  |
|------|------|------|------|-------|-------|--|
|      | x 方向 | y 方向 | z 方向 | y 軸回り | z 軸回り |  |
| 辺 AC | —    | —    | 固定   | —     | —     |  |
| 辺 BE | —    | —    | 固定   | —     | —     |  |
| 辺 DF | 固定   | —    | —    | 固定    | 固定    |  |
| 点 B  | 強制変位 | 固定   | —    | —     | —     |  |

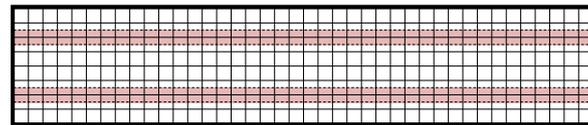
圧縮を受ける自由突出板が非接合の場合、板幅方向の要素分割数が 4 で十分な解析精度が得られることが示されている<sup>14)</sup>。したがって、平板部材の幅を 8 等分割し、x 軸方向の要素分割は、平板部材の長さに依存して、1 要素の y 軸方向の長さに対する、x 軸方向の長さが 0.9 から 1.1 の範囲になるようにする。

他方、圧縮を受ける自由突出板が接合部を有する場合、接合部の 1 要素の 1 辺の大きさが 25mm となるように分割すれば十分な解析精度が得られることが示されている<sup>14)</sup>。要素分割の例を図-3.1(a)に示す。これは、平板部材の幅が 400mm で、平板部材の中央から接合中心までの距離  $c$  が 100mm の中間接合 [図-2.3(c)] に対するものである。1 要素の板幅方向の 1 辺の長さが 25mm となるように等分割し、x 軸方向の要素分割は、平板部材の長さに依存して、1 要素の y 軸方向の長さに対する、x 軸方向の長さが 0.9 から 1.1 の範囲になるようにしてある。

図-3.1(a)の要素分割では、平板部材の幅と長さが大きくなるに従って要素数が多くなり、計算時間が長くなる。そこで、図-3.1(b)は、要素数を減らすことを考えた要素分割である。平板部材の幅を 8 等分割し (実線)、x 軸方向の要素分割は、平板部材の長さに依存して、1 要素の y 軸方向の長さに対する、x 軸方向の長さが 0.9 から 1.1 の範囲になるようにしてある。さらに、接合部の 1 要素の板幅方向の長さが 25mm 以下になるように、接合部を細分割 (破線) する。図-3.1(a)と(b)の要素分割に対する計算結果を表-3.2 に示す。 $\sigma_{\mu}$  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、辺 DF に生じる x 軸方向の反力の合計を断面積で除して得られる値である。 $\lambda$  と  $\sigma_{p0.2}$  は、それぞれ細長比パラメータと圧縮強度の上限値であり、次章で説明する。両者は同じ計算結果を与えるので、図-3.6(b)に示す要素分割に対して計算を行う。



(a) 1 辺の長さが 25mm の等分割



(b) 接合部の細分割

図-3.1 要素分割

表-3.2 計算結果の比較

| $\lambda$ | $\sigma_{fid}/\sigma_{p0.2}$ |          |
|-----------|------------------------------|----------|
|           | 図-3.1(a)                     | 図-3.1(b) |
| 0.5       | 0.918                        | 0.918    |
| 1.0       | 0.665                        | 0.665    |
| 1.5       | 0.374                        | 0.374    |

## 第 4 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。このような平板部材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、 $\sigma_{p0.2}$  : 平板部材の圧縮強度の上限値  
 $A$  : 平板部材の全断面積  
 $A_j$  : 平板部材の接合部の断面積

中央接合 [図-2.3(b)] と中間接合 [図-2.3(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。

$$\sigma_{p0.2} = \frac{B_f - 50}{B_f} \sigma_{0.2} + \frac{50}{B_f} \sigma_{j0.2} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{p0.2} = \frac{B_f - 100}{B_f} \sigma_{0.2} + \frac{100}{B_f} \sigma_{j0.2} \quad (4.3)$$

ここに、 $B_f$  の単位 : mm

非接合 [図-2.3(a)] と増厚中間接合 [図-2.3(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、接合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、平板部材の耐荷力を無次元表示する際、接合の種類に応じて、表-4.1 に示す、平板部材の圧縮強度の上限値  $\sigma_{p0.2}$  を使用する。

表-4.1 平板部材の圧縮強度の上限値  $\sigma_{p0.2}$

| アルミニウム合金  | 非接合 | 中央接合 | 中間接合 | 増厚中間接合 |
|---|-----|------|------|--------|
| A6061-T6<br>A6005C-T5   | A   | B    | C    | A      |
| A5083-O   | A   | A    | A    | —      |
| <p>A : <math>\sigma_{p0.2} = \sigma_{0.2}</math></p> <p>B : <math>\sigma_{p0.2} = \frac{B_f - 50}{B_f} \sigma_{0.2} + \frac{50}{B_f} \sigma_{j0.2}</math></p> <p>C : <math>\sigma_{p0.2} = \frac{B_f - 100}{B_f} \sigma_{0.2} + \frac{100}{B_f} \sigma_{j0.2}</math></p> <p><math>B_f</math> : 平板部材の幅 (単位 mm)</p> |     |      |      |        |

圧縮強度の上限値  $\sigma_{p0.2}$  を用いることにより、細長比パラメータは次式で定義される。

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{p0.2}}{E}} \frac{l}{r} \quad (4.5)$$

ここに、 $\lambda$  : 細長比パラメータ  
 $l$  : 平板部材の長さ  
 $r$  : 平板部材の断面に対する回転半径

$r$  は次式で与えられる。

$$r = \sqrt{\frac{(B_f^3 t_f / 12)}{B_f t_f}} = \frac{B_f}{2\sqrt{3}} \quad (4.6)$$

式(4.6)を式(4.5)に代入して、平板部材の細長比パラメータが次式で与えられる。

$$\lambda = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{p0.2}}{E}} \frac{l}{B_f} \quad (4.7)$$

## 第5章 平板部材の寸法の決定方法

本研究では、局部座屈と横倒れ座屈の連成座屈を扱わないので、局部座屈が起きないようにするために、次式によって平板部材の厚さを決める。

$$t_f = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{0.425} \frac{\sigma_{p0.2}}{E} \frac{(B_f/2)}{R_{f1.0}}} \quad (5.1)$$

ここに、 $\mu$  : ポアソン比 (=0.3)

$R_{f1.0}$  : 自由突出板の耐荷力が  $\sigma_{p0.2}$  を維持する限界の幅厚比パラメータの値

文献 14) で与えられる  $R_{f1.0}$  の値を表-5.1 に示す。

表-5.1  $R_{f1.0}$  の値

| アルミニウム合金  |   | A6061-T6<br>A6005C-T5 | A5083-O |
|---|---|-----------------------|---------|
| 非接合<br>増厚中間接合* ( $400\text{mm} \leq B_f, 100\text{mm} \leq c < B_f/2$ ) |   | 0.6                   | 0.4     |
| 中央接合  | $200\text{mm} \leq B_f \leq 400\text{mm}$ | 0.5                   |         |
|   | $400\text{mm} \leq B_f$                   |                       |         |
| 中間接合 ( $400\text{mm} \leq B_f, 100\text{mm} \leq c < B_f/2$ )           |   |                       |         |

$B_f$  : 平板部材の幅

$c$  : 平板部材の中央から接合中心までの距離

\* : A5083-O に増厚中間接合は適用されない。

次式によって平板部材の長さを決める。

$$l = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \sqrt{\frac{E}{\sigma_{p0.2}}} B_f \lambda \quad (5.2)$$

平板部材の幅  $B_f$  に対して、式(5.1)より厚さ  $t_f$  を決め、細長比パラメータ  $\lambda$  に対して平板部材の長さ  $l$  を式(5.2)より決める。

## 第 6 章 6000 系アルミニウム合金の平板部材の耐荷力

### 6.1 中央接合

アルミニウム合金 A6061-T6 の中央接合に対する  $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}-\lambda$  関係を図-6.1 (数値データは付録参照) に示す. 平板部材の幅  $B_f$  に対して, 200mm, 400mm, 600mm を扱い, 残留応力の有無を考慮している. 非接合に対する結果は, 平板部材の幅が変化しても同じであることを確認している. 図-6.1 から分かるように, すべての解析結果が重なっているため, 残留応力の影響はない. 圧縮残留応力  $\sigma_{rc}$  が母材の 0.2% 耐力  $\sigma_{0.2}$  で無次元化された値を表-6.1 に示す (同表には, 後で述べる中間接合および増厚中間接合に対する値も示してある). A6061-T6 の中央接合の場合, 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ない理由と考えられる.

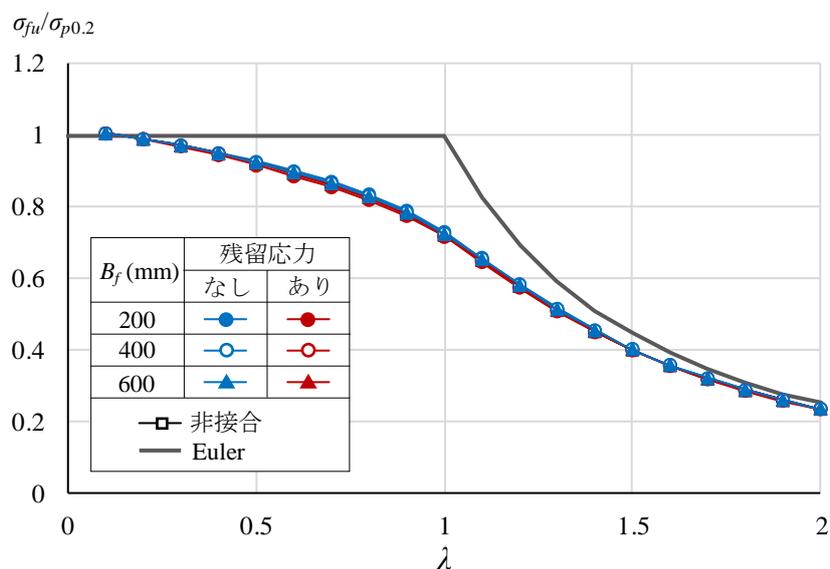


図-6.1 中央接合に対する耐荷力 (A6061-T6)

表-6.1 圧縮残留応力  $\sigma_{rc}/\sigma_{0.2}$  の値

| 接合の位置  | $B_f$ (mm) | $\sigma_{rc}/\sigma_{0.2}$ |           |
|--------|------------|----------------------------|-----------|
|        |            | A6061-T6                   | A6005C-T5 |
| 中央接合   | 200        | 0.147                      | 0.187     |
|        | 400        | 0.063                      | 0.08      |
|        | 600        | 0.04                       | 0.051     |
| 中間接合   | 600        | 0.088                      | 0.112     |
| 増厚中間接合 | 600        | 0.2                        | 0.2       |

## 6.2 中間接合

アルミニウム合金 A6061-T6 の中間接合に対する  $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}-\lambda$  関係を図-6.2 に示す (数値データは付録参照)。平板部材の幅  $B_f$  を 600mm とし、平板部材の中央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。残留応力の有無を考慮している。図-6.2 から分かるように、 $c=100\text{mm}$  の場合、残留応力の有無に関わらず、 $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}$  は、非接合のそれとほぼ同じである。 $c$  が大きくなるに従って、 $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}$  は低下する。残留応力なしの  $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}$  が残留応力ありのそれより低下する。表-6.1 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ので、圧縮残留応力の影響は小さい。したがって、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に、残留応力が存在する方が、存在しない場合より耐荷力が大きくなると考えられる。

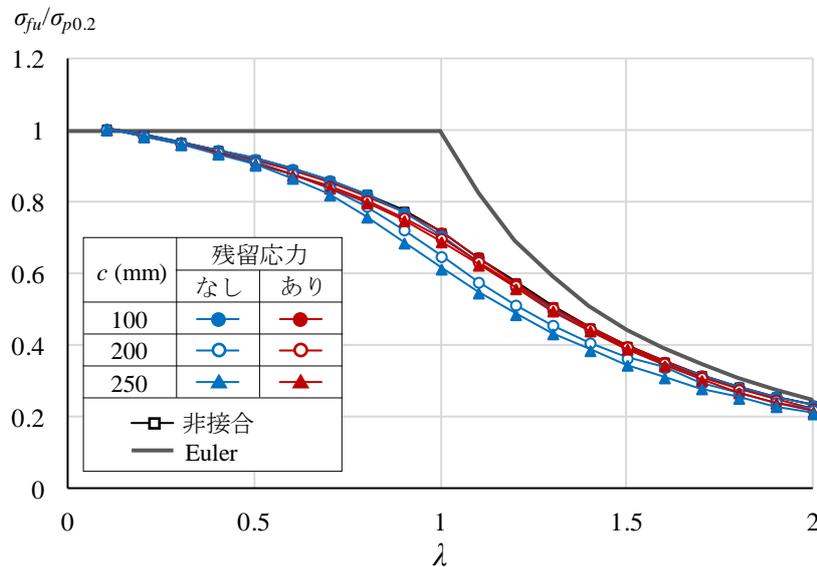
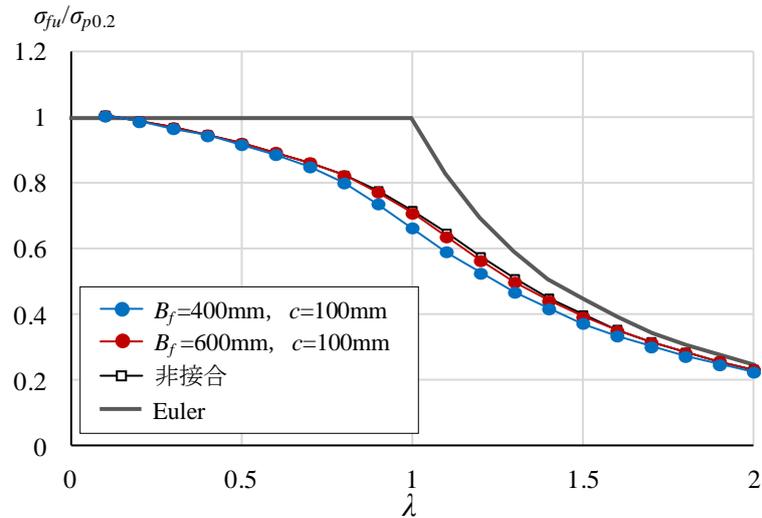
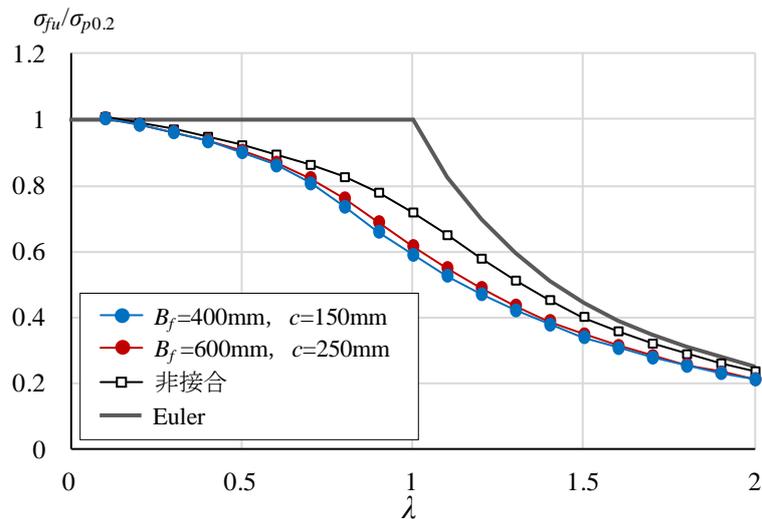


図-6.2 中間接合に対する耐荷力 (A6061-T6)

平板部材の幅が中間接合に対する耐荷力に与える影響を図-6.3 に示す (数値データは付録参照)。残留応力は考慮されていない。図-6.3 の各図から分かるように、 $B_f=400\text{mm}$  に対する  $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}$  が  $B_f=600\text{mm}$  に対するそれより低い。これは、全断面積に対する接合部の断面積の比率が  $B_f=400\text{mm}$  の方が  $B_f=600\text{mm}$  より大きいためである。



(a)  $[B_f=400\text{mm}, c=100\text{mm}]$  と  $[B_f=600\text{mm}, c=100\text{mm}]$  の比較



(b)  $[B_f=400\text{mm}, c=150\text{mm}]$  と  $[B_f=600\text{mm}, c=250\text{mm}]$  の比較

図-6.3 平板部材の幅が中間接合に対する耐荷力に与える影響 (A6061-T6)

### 6.3 増厚中間接合

アルミニウム合金 A6061-T6 の増厚中間接合に対する  $\sigma_{fiu}/\sigma_{p0.2}-\lambda$  関係を図-6.4 に示す (数値データは付録参照) . 本解析は, 式(2.1)で与えられる厚さを幅 50mm の接合部に与えること以外, 前節の中間接合で, 平板部材の幅  $B_f$  が 600mm と同じ解析条件である. 図-6.4 から分かるように,  $c=100\text{mm}$  の場合, 残留応力の有無に関わらず,  $\sigma_{fiu}/\sigma_{p0.2}$  は, 非接合のそれとほぼ同じである. 残留応力なしの場合,  $\sigma_{fiu}/\sigma_{p0.2}$  は,  $\lambda$  が 0.7 から 1.3 の範囲で,  $c$  が大きくなるに従ってわずかに低下し,  $\lambda$  が 1.3 以上の範囲で,  $c$  が大きくなるに従って, わずかに上昇する. 残留応力ありの場合,

$\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}$  は、 $c$  が大きくなるに従って上昇する。この上昇の程度は、中間接合のそれより大きい。これは、増厚中間接合の場合、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）が中間接合のそれより大きくなるためであると考えられる。

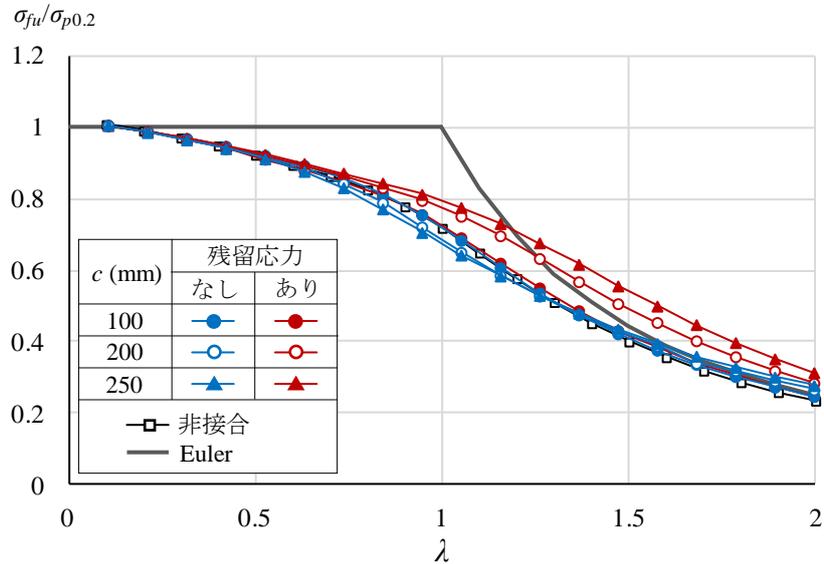
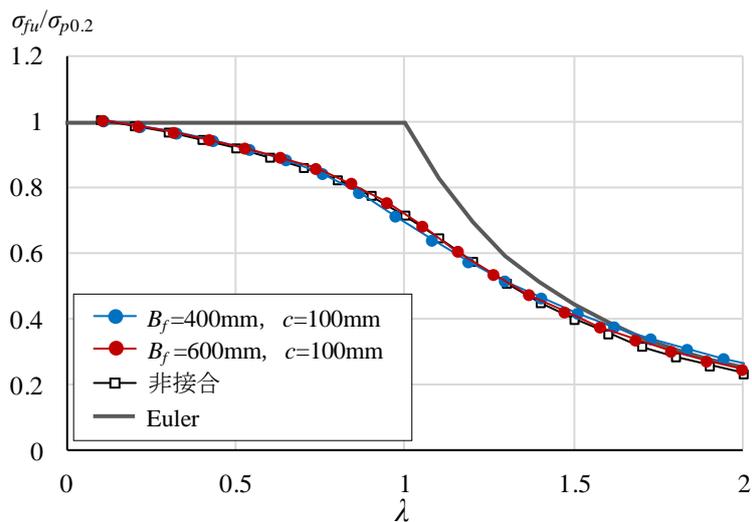
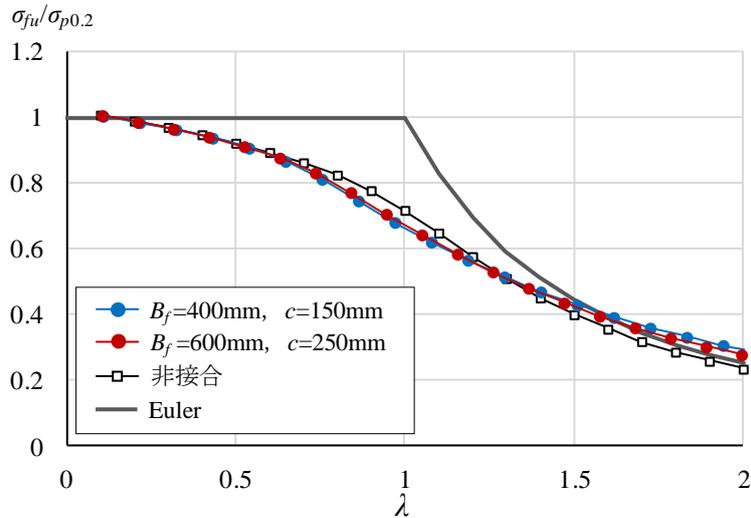


図-6.4 増厚中間接合に対する耐荷力 (A6061-T6)

平板部材の幅が増厚中間接合に対する耐荷力に与える影響を図-6.5に示す（数値データは付録参照）。残留応力は考慮されていない。図-6.5の各図から分かるように、板幅が変化しても  $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}$  はほぼ同じ値を示すので、増厚中間接合では板幅の影響はない。



(a)  $[B_f=400\text{mm}, c=100\text{mm}]$  と  $[B_f=600\text{mm}, c=100\text{mm}]$  の比較

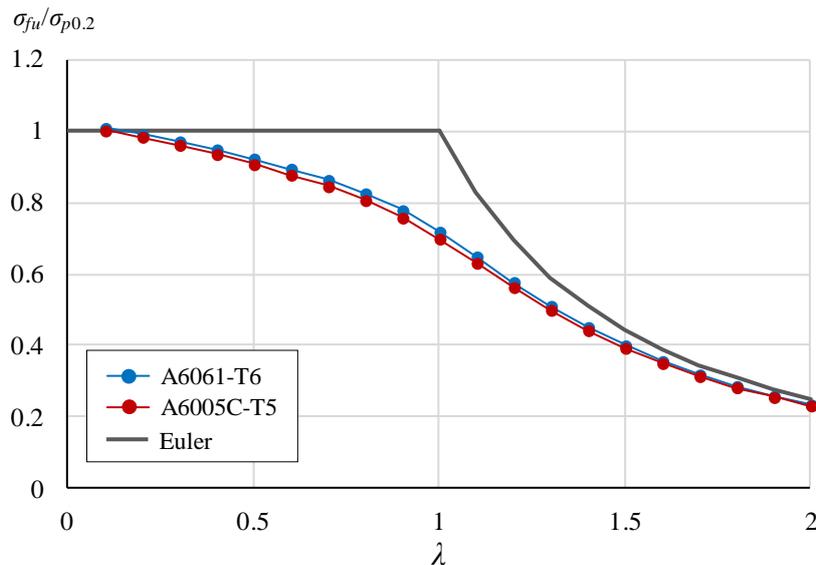


(b)  $[B_f=400\text{mm}, c=150\text{mm}]$  と  $[B_f=600\text{mm}, c=250\text{mm}]$  の比較

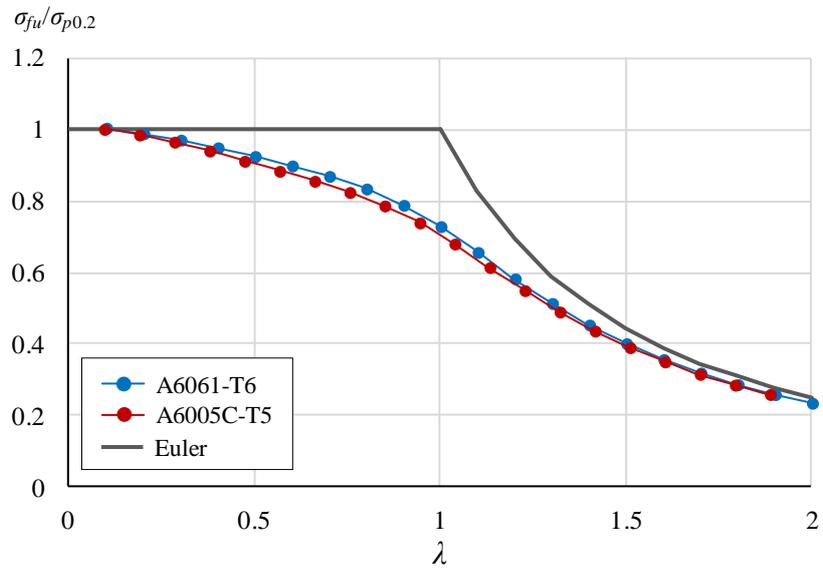
図-6.5 平板部材の幅が増厚中間接合に対する耐荷力に与える影響 (A6061-T6)

#### 6.4 A6061-T6 と A6005C-T5 の平板部材の耐荷力の比較

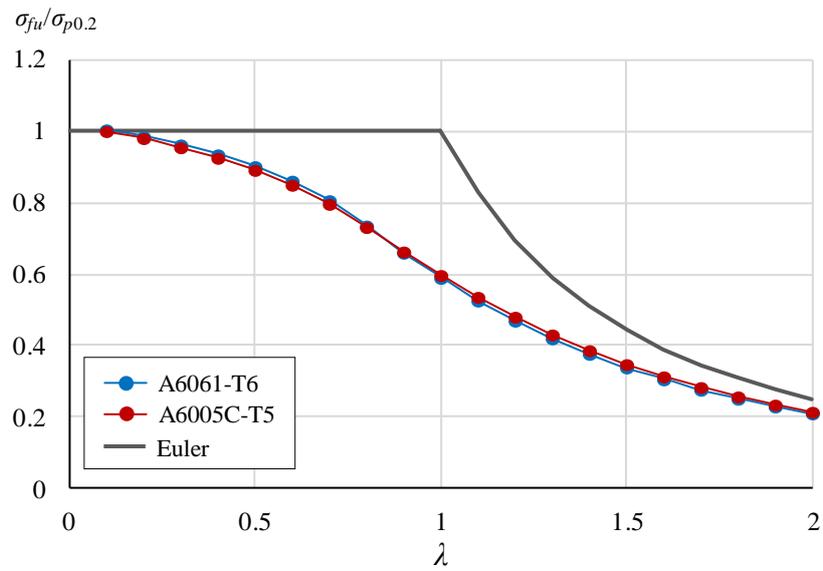
A6061-T6 と A6005C-T5 の平板部材の耐荷力の比較を図-6.6に示す(数値データは付録参照)。これらの解析結果は、中央接合は、平板部材の幅  $B_f$  が 200mm に対するもの、中間接合と増厚中間接合は、平板部材の幅  $B_f$  が 400mm で、 $c$  が 150mm に対するものである。中央接合は、残留応力の影響がないので残留応力を考慮していない。中間接合と増厚中間接合の場合、残留応力がない方が低い耐荷力を与えるので、残留応力を考慮していない。図-6.6 から分かるように、非接合、中央接合、中間接合、増厚中間接合の各場合において、A6061-T6 と A6005C-T5 の平板部材の  $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}-\lambda$  関係はほぼ一致している。



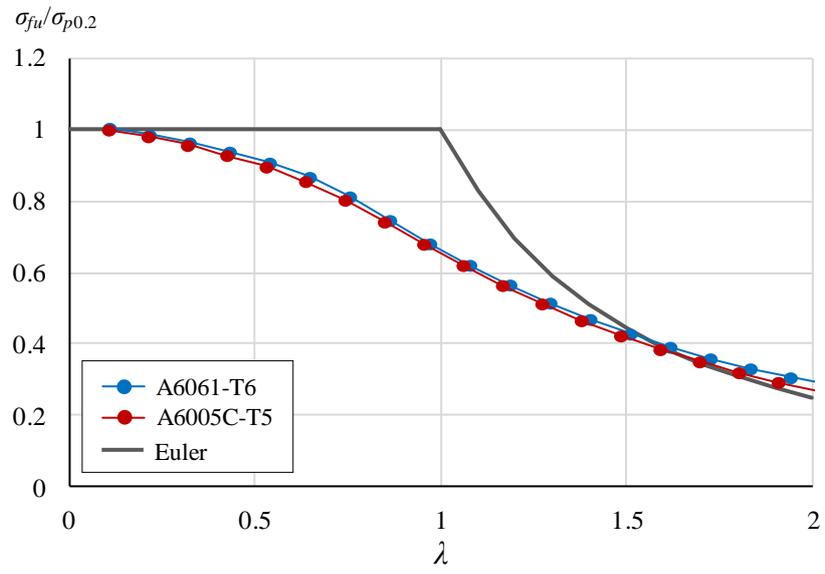
(a) 非接合



(b) 中央接合



(c) 中間接合



(d) 増厚中間接合

図-6.6 A6061-T6 と A6005C-T5 の平板部材の耐荷力の比較

## 第7章 A5083-Oの平板部材の耐荷力

アルミニウム合金 A5083-O の中央接合に対する  $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}-\lambda$  関係を図-7.1 に示す（数値データは付録参照）。平板部材の幅に対して  $B_f=200\text{mm}$ ,  $400\text{mm}$ ,  $600\text{mm}$  を扱い、残留応力を考慮している。図-7.1 から分かるように、中央接合に対する耐荷力は、残留応力の影響により、非接合に対するそれより低下する。圧縮残留応力  $\sigma_{rc}$  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。平板部材の幅  $B_f$  が大きくなるに従って圧縮残留応力が低下するので、耐荷力は非接合に対するそれに近づく。

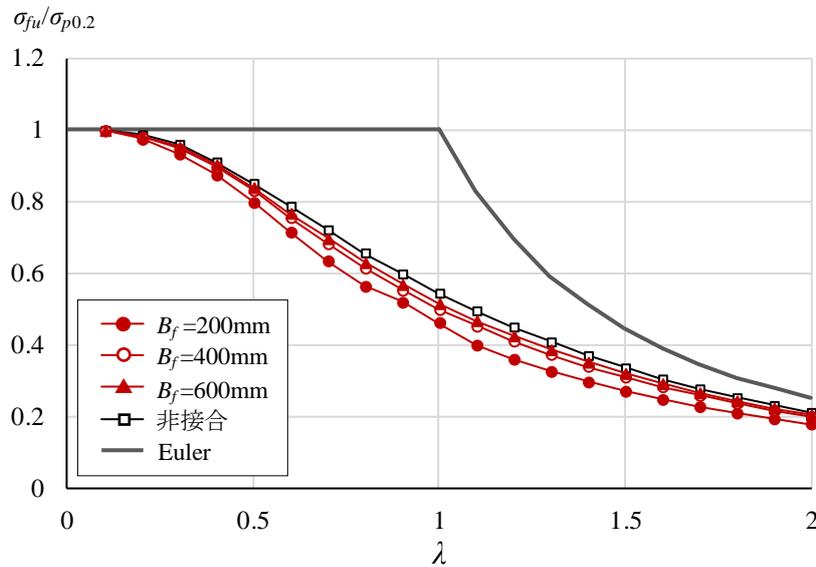


図-7.1 中央接合に対する耐荷力 (A5083-O)

表-7.1 圧縮残留応力  $\sigma_{rc}/\sigma_{0.2}$  の値 (A5083-O)

| $B_f$ | $\sigma_{rc}/\sigma_{0.2}$ |
|-------|----------------------------|
| 200   | 0.333                      |
| 400   | 0.142                      |
| 600   | 0.090                      |

アルミニウム合金 A5083-O の中間接合に対する  $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}-\lambda$  関係を図-7.2 に示す（数値データは付録参照）。平板部材の幅  $B_f$  を  $600\text{mm}$  として、平板部材の中央から接合中心までの距離  $c$  に対して、 $100\text{mm}$ ,  $200\text{mm}$ ,  $250\text{mm}$  を扱っている。残留応力を考慮している。図-7.2 から分かるように、耐荷力は、 $c$  が大きくなるに従って上昇する。

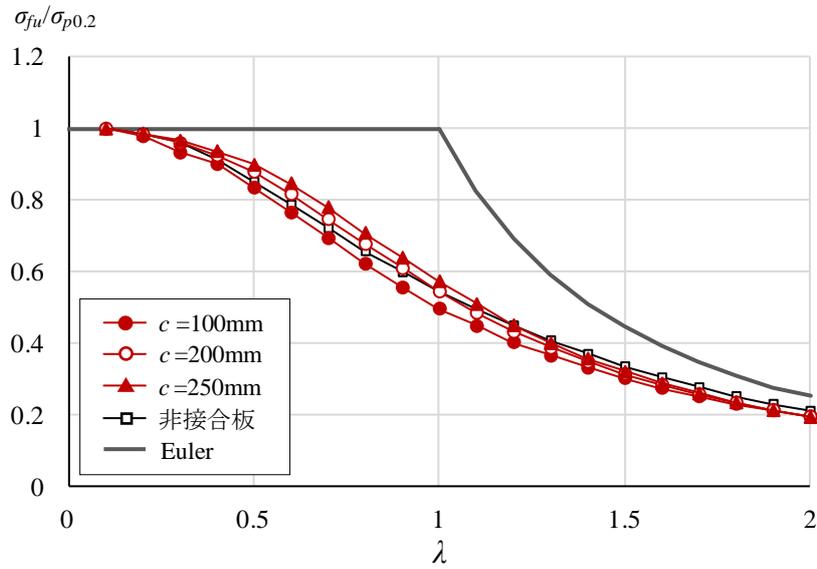


図-7.2 中間接合の耐荷力 (A5083-O)

平板部材の幅が中間接合に対する耐荷力に与える影響を図-7.3 に示す (数値データは付録参照) . 残留応力を考慮している.  $[B_f=400\text{mm}, c=100\text{mm}]$  の耐荷力と  $[B_f=600\text{mm}, c=100\text{mm}]$  の耐荷力はほぼ等しいので, 中間接合に対する耐荷力に, 平板部材の幅が与える影響はない.

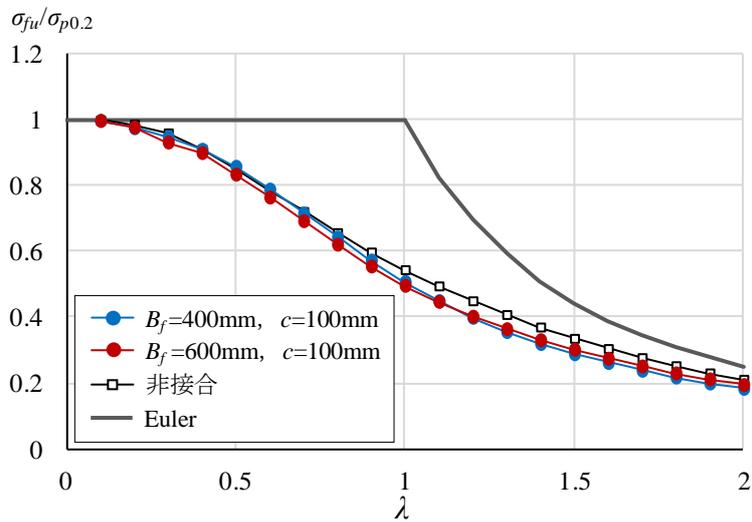


図-7.3  $[B_f=400\text{mm}, c=100\text{mm}]$  と  $[B_f=600\text{mm}, c=100\text{mm}]$  の中間接合に対する耐荷力の比較 (A5083-O)

## 第 8 章 耐荷力曲線

### 8.1 耐荷力曲線の定式化

アルミニウム合金 A6061-T6, A6005C-T5, A5083-O の平板部材の  $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}-\lambda$  関係は, 細長比パラメータ  $\lambda$  のある値で  $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}=1.0$  に交差し, それ以上の範囲で曲線を描く. この曲線を 3 次曲線では近似の程度がよくないので, 次に示す 4 次曲線で近似する.

$$\frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{p0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_{1.0}) \\ Q_1\lambda^4 + Q_2\lambda^3 + Q_3\lambda^2 + Q_4\lambda + Q_5 & (\lambda_{1.0} \leq \lambda \leq 2) \end{cases} \quad (8.1)$$

ここに,  $\lambda_{1.0}$  : 耐荷力曲線が  $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}=1.0$  に交差する細長比パラメータの値

$Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5$  : 定数

解析値に最小 2 乗法を適用して, 式(8.1)の下段の式の  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5$  の値を決める. そして, 式(8.1)の下段の式が 1.0 となる  $\lambda$  の値を  $\lambda_{1.0}$  とする. A6061-T6, A6005C-T5, A5083-O に対する, 耐荷力曲線の区分と  $\lambda_{1.0}, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5$  の値を表-8.1 に示す. さらに, これらの耐荷力曲線を図-8.1 に示す. 次に耐荷力曲線の区分について述べる.

表-8.1 耐荷力曲線の区分と  $\lambda_{1.0}, \lambda_{0.65}, m, n$  の値

| アルミニウム合金  |   | A6061-T6<br>A6005C-T5 | A5083-O |
|---|---|-----------------------|---------|
| 非接合<br>増厚中間接合* ( $400\text{mm} \leq B_f, 100\text{mm} \leq c < B_f/2$ ) |   | JA                    | JC      |
| 中央接合  | $200\text{mm} \leq B_f \leq 400\text{mm}$ | JA                    | JD      |
|   | $400\text{mm} \leq B_f$                   | JA                    | JE      |
| 中間接合 ( $400\text{mm} \leq B_f, 100\text{mm} \leq c < B_f/2$ )           |   | JB                    | JE      |

| \  | $\lambda_{1.0}$ | $Q_1$ | $Q_2$ | $Q_3$ | $Q_4$ | $Q_5$ |
|----|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| JA | 0.13            | 0.05  | -0.04 | -0.30 | -0.03 | 1.01  |
| JB | 0.13            | -0.08 | 0.55  | -1.08 | 0.21  | 0.99  |
| JC | 0.09            | -0.14 | 0.72  | -1.13 | 0.10  | 1.00  |
| JD | 0.09            | -0.20 | 0.95  | -1.31 | 0     | 1.01  |
| JE | 0.09            | -0.18 | 0.91  | -1.36 | 0.12  | 1.00  |

$B_f$  : 平板部材の幅

$c$  : 平板部材の中央から接合中心までの距離

\* : A5083-O に増厚中間接合は適用されない.

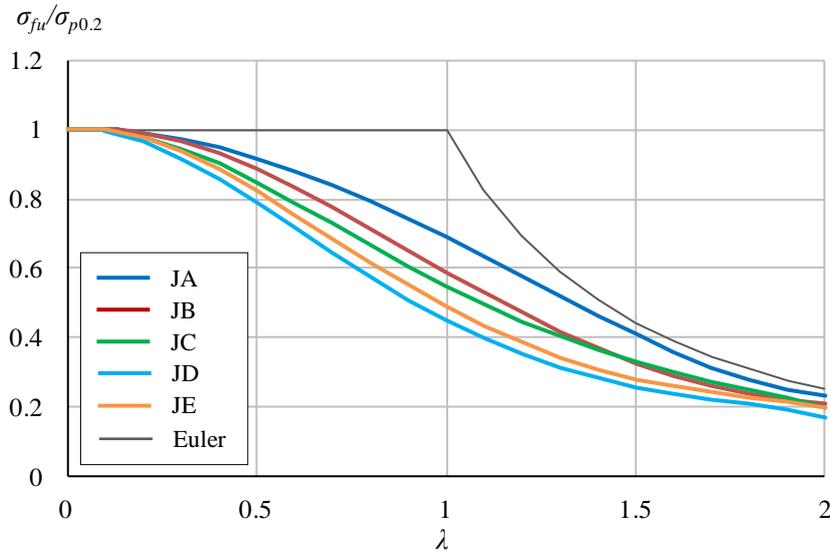


図-8.1 耐荷力曲線

A6061-T6 の非接合の平板部材の耐荷力曲線の作成には、図-6.1 に示す非接合に対する解析値を用いる。

図-6.1 に示すように、A6061-T6 の中央接合に対する  $\sigma_{fiL}/\sigma_{p0.2}$  は、非接合に対するそれとほぼ同じであるので、A6061-T6 の中央接合は非接合と同じ耐荷力区分とする。

6.2 節で述べた考察から、A6061-T6 の中間接合を有する平板部材の耐荷力曲線の作成には、最も低い耐荷力を与える、図-6.3(b)に示す  $[B_f=400\text{mm}, c=150\text{mm}]$  の解析値を適用する。

図-6.4 に示すように、残留応力を考慮しない、A6061-T6 の増厚中間接合に対する  $\sigma_{fiL}/\sigma_{p0.2}$  は、非接合のそれをわずかに低下する  $\lambda$  の範囲が存在する。しかし、残留応力を考慮した  $\sigma_{fiL}/\sigma_{p0.2}$  は非接合のそれを大幅に上回る。実構造物においては、接合による残留応力がある程度発生する。したがって、A6061-T6 の増厚中間接合は非接合と同じ耐荷力区分とする。

図-6.6 に示すように、A6005C-T5 の非接合、中央接合、中間接合、増厚中間接合に対する  $\sigma_{fiL}/\sigma_{p0.2}$  - $\lambda$  関係は A6061-T6 のそれにほぼ一致するため、A6005C-T5 は A6061-T6 と同じ耐荷力区分とする。

A5083-O の非接合の平板部材の耐荷力曲線の作成には、図-7.1 に示す非接合に対する解析値を用いる。

A5083-O の中央接合の場合、図-7.1 を参照して、平板部材の幅を  $200\text{mm} \leq B_f \leq 400\text{mm}$  と  $400 \leq B_f$  の二つに区分する。前者の耐荷力曲線の作成には、平板部材の幅が 200mm の解析値を用い、後者の耐荷力曲線の作成には、平板部材の幅が 400mm の解析値を用いる。

A5083-O の中間接合を有する平板部材の耐荷力曲線の作成には、 $\lambda$  が 1.4 以下で最も低い耐荷力を与える、図-7.3 に示す  $[B_f=600\text{mm}, c=100\text{mm}]$  の解析値を適用する。図-8.2 に示すように、 $[B_f=600\text{mm}, c=100\text{mm}]$  の中間接合に対する解析値は、 $B_f=400\text{mm}$  の中央接合に対する解析値にほぼ等しいので、中間接合は、 $400\text{mm} \leq B_f$  の中央接合と同じ耐荷力区分とする。

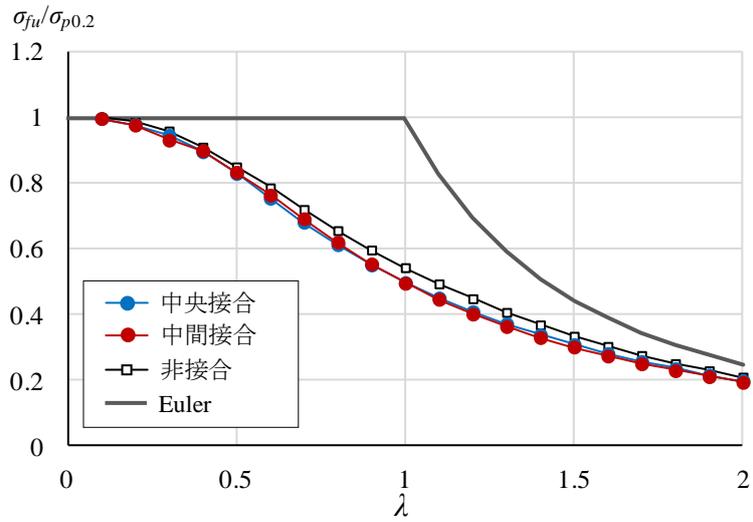
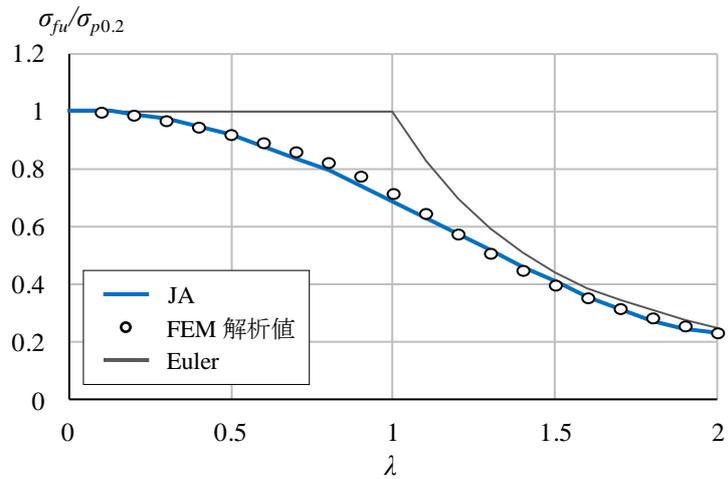
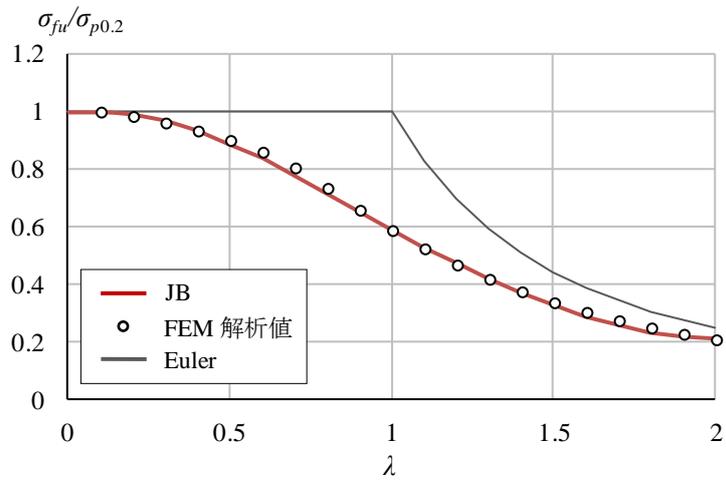


図-8.2  $B_f=400\text{mm}$  の中央接合と [ $B_f=600\text{mm}$ ,  $c=100\text{mm}$ ] の中間接合 に対する耐荷力の比較 (A5083-O)

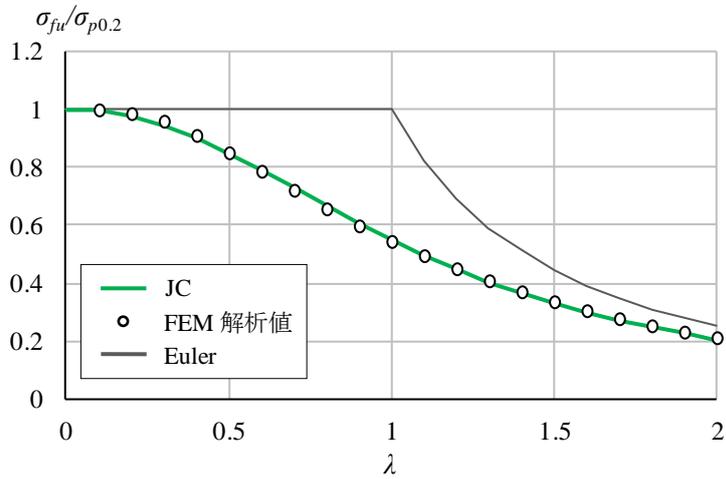
各強度区分に対して，式(8.1)が与える耐荷力曲線と解析値との比較を図-8.3 に示す．耐荷力 曲線は解析値にほぼ一致している．



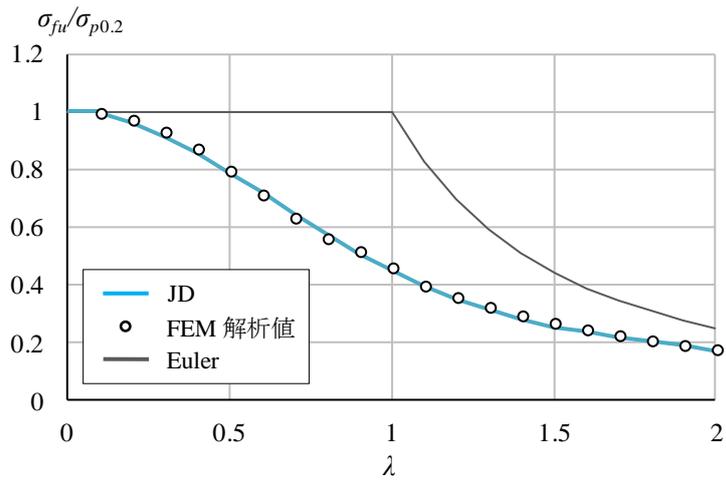
(a) JA



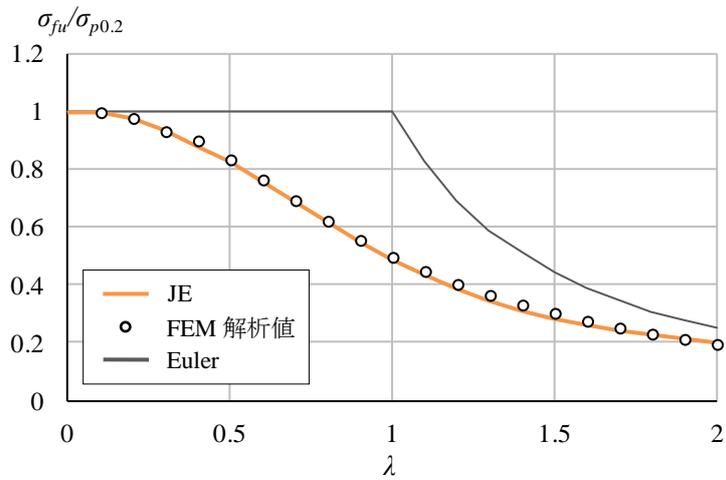
(b) JB



(c) JC



(d) JD

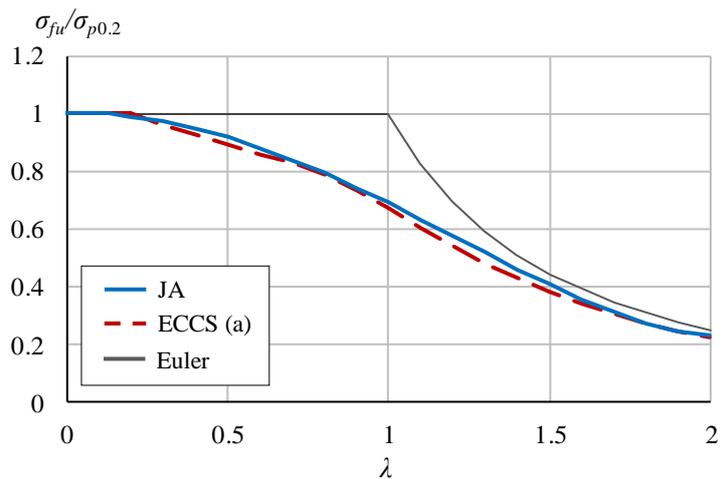


(e) JE

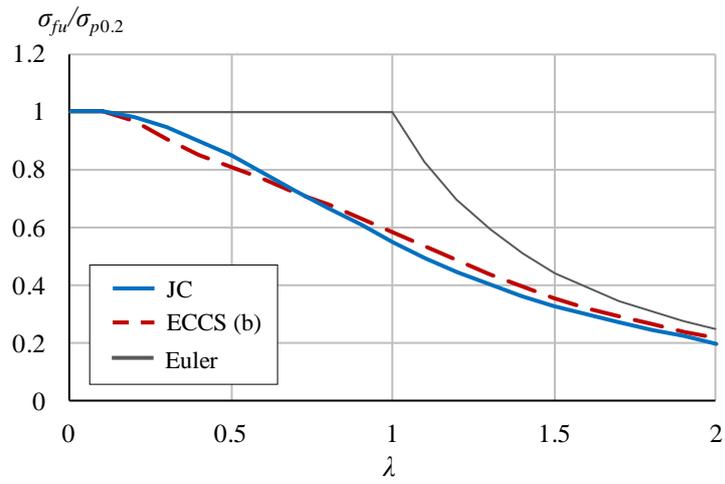
図-8.3 FEM 解析値との比較

## 8.2 ECCS の耐荷力曲線との比較

ECCS で規定される耐荷力曲線<sup>20)</sup>と式(8.1)が与える耐荷力曲線の比較を図-8.4に示す。ECCS の耐荷力曲線は、圧縮を受ける二軸対称断面の押出型材の耐荷力を FEM 解析で算出したものである<sup>21)</sup>。ECCS の耐荷力曲線には、押出型材の最大初期たわみに対して  $l/1000$  が考慮され ( $l$  は部材の長さ)、押出型材には残留応力が発生しないので、残留応力は考慮されていない。図-8.4(a)と(b)は、それぞれ熱処理アルミニウム合金 (6000 系アルミニウム合金) と非熱処理アルミニウム合金 (5000 系アルミニウム合金) に対する耐荷力曲線である。両者ともに、式(8.1)が与える耐荷力曲線と ECCS の耐荷力曲線はお互いに近い。



(a) 熱処理アルミニウム合金



(b) 非熱処理アルミニウム合金

図-8.4 ECCS の耐荷力曲線との比較

## 第9章 結論

本研究は、有限要素法による弾塑性有限変位解析によって桁の横倒れ耐荷力を明らかにした。主な結論は次の通りである。

- (1) アルミニウム合金 A6061-T6 の中央接合に対して、 $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}$  表示の耐荷力は、非接合に対するそれにはほぼ等しい。残留応力の影響はない。
- (2) アルミニウム合金 A6061-T6 の中間接合に対して、 $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}$  表示の耐荷力は、平板部材の中央から接合中心までの距離が 100mm の場合には、残留応力の有無に関わらず、非接合に対するそれにはほぼ等しく、その距離が大きくなるに従って、低下する。残留応力を考慮した耐荷力が、残留応力を考慮しない耐荷力より高くなる。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。
- (3) アルミニウム合金 A6061-T6 の増厚中間接合に対して、耐荷力は、平板部材の中央から接合中心までの距離が 100mm の場合には、残留応力の有無に関わらず、非接合に対するそれにはほぼ等しい。平板部材の中央から接合中心までの距離が大きくなると、残留応力を考慮しない耐荷力は、非接合のそれをわずかに下回る細長比パラメータの範囲が存在する。しかし、残留応力を考慮した耐荷力は非接合のそれを大幅に上回る。これは、増厚中間接合の場合、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）が中間接合のそれより大きくなるためであると考えられる。
- (4) 非接合、中央接合、中間接合、増厚中間接合の各場合において、A6005C-T5 と A6061-T6 の平板部材の  $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}$  表示の耐荷力はほぼ等しい。
- (5) アルミニウム合金 A5083-O の中央接合に対する耐荷力は、残留応力の影響により、非接合に対するそれより低下する。平板部材の幅が大きくなるに従って、耐荷力は上昇し、非接合板のそれに近づく。
- (6) アルミニウム合金 A5083-O の中間接合に対する耐荷力は、平板部材の中央から接合中心までの距離が大きくなるに従って上昇する。
- (7) 本研究の成果に基づいて、次の耐荷力算定式を与えた。

$$\frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{p0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_{1.0}) \\ Q_1\lambda^4 + Q_2\lambda^3 + Q_3\lambda^2 + Q_4\lambda + Q_5 & (\lambda_{1.0} \leq \lambda \leq 2) \end{cases}$$

ここに、 $\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{p0.2}}{E}} \frac{l}{r}$

$\sigma_{p0.2}$  : 表-4.1 参照

$\lambda_{1.0}$  : 耐荷力曲線が  $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}=1.0$  に交差する細長比パラメータの値

$Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5$  : 定数

|  |   |                       |         |
|--|---|-----------------------|---------|
| アルミニウム合金   |   | A6061-T6<br>A6005C-T5 | A5083-O |
| 非接合<br>増厚中間接合* ( $400\text{mm} \leq B_f$ , $100\text{mm} \leq c < B_f/2$ ) |   | JA                    | JC      |
| 中央接合   | $200\text{mm} \leq B_f \leq 400\text{mm}$ | JA                    | JD      |
|  | $400\text{mm} \leq B_f$                   | JA                    | JE      |
| 中間接合 ( $400\text{mm} \leq B_f$ , $100\text{mm} \leq c < B_f/2$ )           |   | JB                    | JE      |

|    | $\lambda_{1.0}$ | $Q_1$ | $Q_2$ | $Q_3$ | $Q_4$ | $Q_5$ |
|----|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| JA | 0.13            | 0.05  | -0.04 | -0.30 | -0.03 | 1.01  |
| JB | 0.13            | -0.08 | 0.55  | -1.08 | 0.21  | 0.99  |
| JC | 0.09            | -0.14 | 0.72  | -1.13 | 0.10  | 1.00  |
| JD | 0.09            | -0.20 | 0.95  | -1.31 | 0     | 1.01  |
| JE | 0.09            | -0.18 | 0.91  | -1.36 | 0.12  | 1.00  |

$B_f$  : 平板部材の幅

$c$  : 平板部材の中央から接合中心までの距離

\* : A5083-O に増厚中間接合は適用されない。

- (8) 非接合の平板部材に対して、本研究で与えられた耐荷力曲線は、ECCS<sup>20</sup>で規定される耐荷力曲線に近い。

## 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－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・ゲルグリ，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) 大倉一郎，小笠原康二：接合位置を考慮したアルミニウム合金板の圧縮耐荷力，構造工学論文集，Vol.56A，pp.111-121，2010.
- 10) 大倉一郎，小笠原康二：接合位置と板幅がアルミニウム合金板の曲げ耐荷力に与える影響，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.68，No.2，pp.287-299，2012.
- 11) 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.
- 12) 大倉一郎，佐藤純：摩擦撹拌接合を考慮した突起付きアルミニウム合金板の提案，ALST 研究レポート，No.11，2009. [http://alst.jp/pdf/ALST\\_report11.pdf](http://alst.jp/pdf/ALST_report11.pdf)
- 13) 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.
- 14) 西森文子，大倉一郎：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，No.34，2014. [http://alst.jp/pdf/ALST\\_report34.pdf](http://alst.jp/pdf/ALST_report34.pdf)
- 15) 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](http://alst.jp/pdf/aluminum_str_2.pdf)
- 16) 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.
- 17) 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次改定試案），1998.
- 18) 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. [http://alst.jp/pdf/ALST\\_report1.pdf](http://alst.jp/pdf/ALST_report1.pdf)

- 19) 日本マーク : MARC, K6, 2005.
- 20) ECCS: European recommendations for aluminum alloy structures, First edn, 1978.
- 21) F.M. Mazzolani: Aluminum Alloy Structures: Second edition, E & FN Spon, 1995.

付録 数値データ

A6061-T6

非接合

中央接合 (図-6.1)

| $\lambda$ | $\sigma_{fil}/\sigma_{p0.2}$ | $\lambda$ | $\sigma_{fil}/\sigma_{p0.2}$ |       |                    |       |                    |    |
|-----------|------------------------------|-----------|------------------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|----|
|           |                              |           | $B_f=200\text{mm}$           |       | $B_f=400\text{mm}$ |       | $B_f=600\text{mm}$ |    |
|           |                              |           | 残留応力                         |       | 残留応力               |       | 残留応力               |    |
|           |                              |           | なし                           | あり    | なし                 | あり    | なし                 | あり |
| 0.1       | 1.000                        | 0.1       | 1.000                        | 1.000 | 1.000              | 1.000 | 1.000              |    |
| 0.2       | 0.990                        | 0.2       | 0.989                        | 0.989 | 0.989              | 0.989 | 0.989              |    |
| 0.3       | 0.971                        | 0.3       | 0.971                        | 0.969 | 0.971              | 0.970 | 0.971              |    |
| 0.4       | 0.948                        | 0.4       | 0.950                        | 0.944 | 0.949              | 0.949 | 0.948              |    |
| 0.5       | 0.923                        | 0.5       | 0.925                        | 0.915 | 0.924              | 0.920 | 0.923              |    |
| 0.6       | 0.894                        | 0.6       | 0.899                        | 0.884 | 0.896              | 0.892 | 0.896              |    |
| 0.7       | 0.863                        | 0.7       | 0.870                        | 0.854 | 0.866              | 0.861 | 0.865              |    |
| 0.8       | 0.825                        | 0.8       | 0.835                        | 0.819 | 0.831              | 0.825 | 0.829              |    |
| 0.9       | 0.778                        | 0.9       | 0.789                        | 0.774 | 0.785              | 0.780 | 0.783              |    |
| 1         | 0.718                        | 1         | 0.729                        | 0.715 | 0.725              | 0.720 | 0.723              |    |
| 1.1       | 0.649                        | 1.1       | 0.657                        | 0.645 | 0.655              | 0.651 | 0.653              |    |
| 1.2       | 0.578                        | 1.2       | 0.583                        | 0.574 | 0.582              | 0.578 | 0.581              |    |
| 1.3       | 0.511                        | 1.3       | 0.515                        | 0.507 | 0.514              | 0.511 | 0.513              |    |
| 1.4       | 0.452                        | 1.4       | 0.454                        | 0.449 | 0.454              | 0.451 | 0.453              |    |
| 1.5       | 0.400                        | 1.5       | 0.402                        | 0.398 | 0.402              | 0.400 | 0.402              |    |
| 1.6       | 0.357                        | 1.6       | 0.358                        | 0.355 | 0.358              | 0.356 | 0.358              |    |
| 1.7       | 0.319                        | 1.7       | 0.320                        | 0.317 | 0.320              | 0.319 | 0.320              |    |
| 1.8       | 0.287                        | 1.8       | 0.288                        | 0.285 | 0.288              | 0.286 | 0.287              |    |
| 1.9       | 0.259                        | 1.9       | 0.260                        | 0.258 | 0.260              | 0.259 | 0.260              |    |
| 2         | 0.235                        | 2         | 0.236                        | 0.234 | 0.236              | 0.235 | 0.235              |    |

中間接合 (図-6.2 と図-6.3)

| $\lambda$ | $\sigma_{fu}/\sigma_{p0.2}$ |       |         |       |                    |       |         |       |         |       |
|-----------|-----------------------------|-------|---------|-------|--------------------|-------|---------|-------|---------|-------|
|           | $B_f=400\text{mm}$          |       |         |       | $B_f=600\text{mm}$ |       |         |       |         |       |
|           | $c=100$                     |       | $c=150$ |       | $c=100$            |       | $c=200$ |       | $c=250$ |       |
|           | 残留応力                        |       | 残留応力    |       | 残留応力               |       | 残留応力    |       | 残留応力    |       |
|           | なし                          | あり    | なし      | あり    | なし                 | あり    | なし      | あり    | なし      | あり    |
| 0.1       | 1.000                       | 1.000 | 1.000   | 1.000 | 1.000              | 1.000 | 1.000   | 1.000 | 1.000   | 1.000 |
| 0.2       | 0.990                       | 0.989 | 0.985   | 0.986 | 0.989              | 0.989 | 0.987   | 0.988 | 0.985   | 0.987 |
| 0.3       | 0.971                       | 0.971 | 0.962   | 0.964 | 0.970              | 0.969 | 0.967   | 0.967 | 0.963   | 0.965 |
| 0.4       | 0.948                       | 0.950 | 0.934   | 0.938 | 0.948              | 0.946 | 0.942   | 0.943 | 0.937   | 0.939 |
| 0.5       | 0.923                       | 0.925 | 0.902   | 0.909 | 0.922              | 0.920 | 0.914   | 0.915 | 0.906   | 0.910 |
| 0.6       | 0.894                       | 0.899 | 0.861   | 0.877 | 0.895              | 0.890 | 0.882   | 0.883 | 0.870   | 0.878 |
| 0.7       | 0.863                       | 0.870 | 0.806   | 0.843 | 0.863              | 0.858 | 0.843   | 0.848 | 0.823   | 0.842 |
| 0.8       | 0.825                       | 0.835 | 0.736   | 0.803 | 0.824              | 0.820 | 0.792   | 0.807 | 0.761   | 0.801 |
| 0.9       | 0.778                       | 0.789 | 0.659   | 0.755 | 0.774              | 0.774 | 0.725   | 0.759 | 0.689   | 0.751 |
| 1         | 0.718                       | 0.729 | 0.589   | 0.700 | 0.709              | 0.717 | 0.651   | 0.701 | 0.616   | 0.692 |
| 1.1       | 0.649                       | 0.657 | 0.526   | 0.635 | 0.637              | 0.648 | 0.579   | 0.637 | 0.549   | 0.627 |
| 1.2       | 0.578                       | 0.583 | 0.470   | 0.568 | 0.565              | 0.576 | 0.515   | 0.570 | 0.489   | 0.561 |
| 1.3       | 0.511                       | 0.515 | 0.420   | 0.504 | 0.500              | 0.509 | 0.459   | 0.506 | 0.435   | 0.499 |
| 1.4       | 0.452                       | 0.454 | 0.377   | 0.446 | 0.443              | 0.450 | 0.410   | 0.449 | 0.388   | 0.443 |
| 1.5       | 0.400                       | 0.402 | 0.339   | 0.393 | 0.394              | 0.399 | 0.366   | 0.398 | 0.347   | 0.392 |
| 1.6       | 0.357                       | 0.358 | 0.306   | 0.345 | 0.352              | 0.356 | 0.340   | 0.353 | 0.312   | 0.345 |
| 1.7       | 0.319                       | 0.320 | 0.277   | 0.304 | 0.315              | 0.318 | 0.296   | 0.313 | 0.281   | 0.304 |
| 1.8       | 0.287                       | 0.288 | 0.251   | 0.269 | 0.284              | 0.286 | 0.268   | 0.279 | 0.255   | 0.270 |
| 1.9       | 0.259                       | 0.260 | 0.229   | 0.240 | 0.259              | 0.258 | 0.243   | 0.250 | 0.232   | 0.241 |
| 2         | 0.235                       | 0.236 | 0.210   | 0.215 | 0.234              | 0.234 | 0.221   | 0.225 | 0.211   | 0.216 |

増厚中間接合 (図-6.4 と図-6.5)

| $\lambda$ | $\sigma_{fi}/\sigma_{p0.2}$ |         |
|-----------|-----------------------------|---------|
|           | $B_f=400\text{mm}$          |         |
|           | $c=100$                     | $c=150$ |
|           | 残留応力                        | 残留応力    |
|           | なし                          | なし      |
| 0.108     | 1.000                       | 1.000   |
| 0.216     | 0.987                       | 0.985   |
| 0.323     | 0.967                       | 0.963   |
| 0.431     | 0.945                       | 0.938   |
| 0.539     | 0.918                       | 0.907   |
| 0.647     | 0.886                       | 0.867   |
| 0.755     | 0.844                       | 0.813   |
| 0.863     | 0.787                       | 0.747   |
| 0.970     | 0.715                       | 0.681   |
| 1.078     | 0.642                       | 0.621   |
| 1.186     | 0.576                       | 0.566   |
| 1.294     | 0.518                       | 0.516   |
| 1.402     | 0.466                       | 0.470   |
| 1.509     | 0.419                       | 0.429   |
| 1.617     | 0.378                       | 0.392   |
| 1.725     | 0.342                       | 0.360   |
| 1.833     | 0.310                       | 0.332   |
| 1.941     | 0.281                       | 0.307   |
| 2.049     | 0.257                       | 0.284   |
| 2.156     | 0.235                       | 0.263   |

| $\lambda$ | $\sigma_{fi}/\sigma_{p0.2}$ |       |         |       |         |    |
|-----------|-----------------------------|-------|---------|-------|---------|----|
|           | $B_f=600\text{mm}$          |       |         |       |         |    |
|           | $c=100$                     |       | $c=200$ |       | $c=250$ |    |
|           | 残留応力                        |       | 残留応力    |       | 残留応力    |    |
|           | なし                          | あり    | なし      | あり    | なし      | あり |
| 0.105     | 1.000                       | 1.000 | 1.000   | 1.000 | 1.000   |    |
| 0.210     | 0.988                       | 0.988 | 0.987   | 0.988 | 0.989   |    |
| 0.315     | 0.970                       | 0.966 | 0.967   | 0.968 | 0.970   |    |
| 0.420     | 0.948                       | 0.941 | 0.943   | 0.944 | 0.948   |    |
| 0.525     | 0.922                       | 0.911 | 0.916   | 0.918 | 0.925   |    |
| 0.630     | 0.894                       | 0.879 | 0.884   | 0.890 | 0.899   |    |
| 0.735     | 0.860                       | 0.845 | 0.844   | 0.862 | 0.873   |    |
| 0.840     | 0.815                       | 0.807 | 0.789   | 0.831 | 0.845   |    |
| 0.945     | 0.756                       | 0.756 | 0.722   | 0.796 | 0.813   |    |
| 1.050     | 0.684                       | 0.692 | 0.651   | 0.752 | 0.776   |    |
| 1.155     | 0.608                       | 0.621 | 0.586   | 0.697 | 0.731   |    |
| 1.260     | 0.537                       | 0.552 | 0.529   | 0.634 | 0.677   |    |
| 1.365     | 0.476                       | 0.488 | 0.477   | 0.569 | 0.617   |    |
| 1.470     | 0.423                       | 0.432 | 0.431   | 0.508 | 0.557   |    |
| 1.575     | 0.377                       | 0.383 | 0.389   | 0.455 | 0.501   |    |
| 1.680     | 0.338                       | 0.342 | 0.341   | 0.404 | 0.449   |    |
| 1.785     | 0.304                       | 0.306 | 0.320   | 0.359 | 0.399   |    |
| 1.890     | 0.274                       | 0.275 | 0.292   | 0.320 | 0.353   |    |
| 1.995     | 0.248                       | 0.249 | 0.267   | 0.285 | 0.315   |    |
| 2.100     | 0.226                       | 0.225 | 0.245   | 0.256 | 0.282   |    |

A6005C-T5 (図-6.6)

| 非接合       |                              | 中央接合      |                              | 中間接合      |                              | 増厚中間接合    |                              |
|-----------|------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|------------------------------|
| $\lambda$ | $\sigma_{fit}/\sigma_{p0.2}$ | $\lambda$ | $\sigma_{fit}/\sigma_{p0.2}$ | $\lambda$ | $\sigma_{fit}/\sigma_{p0.2}$ | $\lambda$ | $\sigma_{fit}/\sigma_{p0.2}$ |
| 0.1       | 1.000                        | 0.094     | 1.000                        | 0.1       | 0.999                        | 0.106     | 0.999                        |
| 0.2       | 0.983                        | 0.189     | 0.986                        | 0.2       | 0.980                        | 0.212     | 0.981                        |
| 0.3       | 0.961                        | 0.283     | 0.966                        | 0.3       | 0.954                        | 0.318     | 0.956                        |
| 0.4       | 0.935                        | 0.377     | 0.941                        | 0.4       | 0.925                        | 0.424     | 0.928                        |
| 0.5       | 0.907                        | 0.471     | 0.912                        | 0.5       | 0.891                        | 0.530     | 0.896                        |
| 0.6       | 0.877                        | 0.566     | 0.884                        | 0.6       | 0.849                        | 0.636     | 0.855                        |
| 0.7       | 0.845                        | 0.660     | 0.856                        | 0.7       | 0.796                        | 0.742     | 0.803                        |
| 0.8       | 0.806                        | 0.755     | 0.825                        | 0.8       | 0.731                        | 0.848     | 0.742                        |
| 0.9       | 0.757                        | 0.849     | 0.787                        | 0.9       | 0.663                        | 0.954     | 0.680                        |
| 1         | 0.699                        | 0.943     | 0.740                        | 1         | 0.597                        | 1.060     | 0.621                        |
| 1.1       | 0.631                        | 1.038     | 0.681                        | 1.1       | 0.536                        | 1.166     | 0.565                        |
| 1.2       | 0.563                        | 1.132     | 0.615                        | 1.2       | 0.481                        | 1.272     | 0.513                        |
| 1.3       | 0.499                        | 1.226     | 0.550                        | 1.3       | 0.431                        | 1.378     | 0.466                        |
| 1.4       | 0.443                        | 1.321     | 0.491                        | 1.4       | 0.387                        | 1.484     | 0.424                        |
| 1.5       | 0.393                        | 1.415     | 0.437                        | 1.5       | 0.348                        | 1.590     | 0.386                        |
| 1.6       | 0.351                        | 1.509     | 0.391                        | 1.6       | 0.314                        | 1.696     | 0.351                        |
| 1.7       | 0.314                        | 1.604     | 0.351                        | 1.7       | 0.284                        | 1.802     | 0.321                        |
| 1.8       | 0.283                        | 1.698     | 0.316                        | 1.8       | 0.258                        | 1.908     | 0.294                        |
| 1.9       | 0.256                        | 1.792     | 0.286                        | 1.9       | 0.235                        | 2.014     | 0.270                        |
| 2         | 0.232                        | 1.887     | 0.260                        | 2         | 0.215                        | 2.120     | 0.248                        |

A5083-O (図-7.1~7.3)

| $\lambda$ | $\sigma_{fi}/\sigma_{p0.2}$ |                    |                    |                    |                    |                    |         |         |
|-----------|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|
|           | 非接合                         | 中央接合               |                    |                    | 中間接合               |                    |         |         |
|           |                             |                    |                    |                    | $B_f=400\text{mm}$ | $B_f=600\text{mm}$ |         |         |
|           |                             | $B_f=200\text{mm}$ | $B_f=400\text{mm}$ | $B_f=600\text{mm}$ | $c=100$            | $c=100$            | $c=200$ | $c=250$ |
| 0.1       | 0.999                       | 0.998              | 0.998              | 0.998              | 0.998              | 0.998              | 0.999   | 0.999   |
| 0.2       | 0.986                       | 0.974              | 0.980              | 0.982              | 0.976              | 0.978              | 0.983   | 0.986   |
| 0.3       | 0.960                       | 0.933              | 0.947              | 0.952              | 0.949              | 0.932              | 0.959   | 0.965   |
| 0.4       | 0.911                       | 0.874              | 0.897              | 0.902              | 0.910              | 0.900              | 0.924   | 0.936   |
| 0.5       | 0.851                       | 0.797              | 0.830              | 0.839              | 0.859              | 0.834              | 0.879   | 0.898   |
| 0.6       | 0.787                       | 0.715              | 0.755              | 0.767              | 0.789              | 0.765              | 0.816   | 0.847   |
| 0.7       | 0.721                       | 0.634              | 0.682              | 0.696              | 0.716              | 0.693              | 0.746   | 0.780   |
| 0.8       | 0.657                       | 0.563              | 0.614              | 0.629              | 0.644              | 0.622              | 0.677   | 0.708   |
| 0.9       | 0.598                       | 0.518              | 0.552              | 0.568              | 0.573              | 0.555              | 0.609   | 0.638   |
| 1         | 0.544                       | 0.462              | 0.498              | 0.515              | 0.508              | 0.496              | 0.544   | 0.573   |
| 1.1       | 0.494                       | 0.399              | 0.451              | 0.467              | 0.450              | 0.447              | 0.484   | 0.509   |
| 1.2       | 0.449                       | 0.359              | 0.410              | 0.424              | 0.399              | 0.402              | 0.431   | 0.450   |
| 1.3       | 0.408                       | 0.325              | 0.373              | 0.386              | 0.356              | 0.364              | 0.386   | 0.399   |
| 1.4       | 0.369                       | 0.295              | 0.339              | 0.351              | 0.319              | 0.331              | 0.347   | 0.357   |
| 1.5       | 0.335                       | 0.270              | 0.309              | 0.319              | 0.288              | 0.302              | 0.313   | 0.319   |
| 1.6       | 0.304                       | 0.247              | 0.282              | 0.291              | 0.261              | 0.275              | 0.283   | 0.287   |
| 1.7       | 0.276                       | 0.227              | 0.258              | 0.265              | 0.238              | 0.251              | 0.257   | 0.259   |
| 1.8       | 0.252                       | 0.209              | 0.236              | 0.243              | 0.217              | 0.230              | 0.234   | 0.234   |
| 1.9       | 0.230                       | 0.193              | 0.217              | 0.222              | 0.199              | 0.212              | 0.213   | 0.212   |
| 2         | 0.210                       | 0.178              | 0.199              | 0.204              | 0.183              | 0.194              | 0.195   | 0.193   |