

# 圧縮を受けるアルミニウム合金 押出型材の耐荷力

ALST 研究レポート 37

2014 年 9 月

大阪大学大学院工学研究科

山田了平，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得られた解析結果により、ALST 研究レポート No.36「アルミニウム合金桁の横倒れ耐荷力」で与えられた、圧縮を受ける平板部材の耐荷力曲線が、圧縮を受ける 2 軸対称の I 型断面の押出形材および箱型断面の押出形材の耐荷力を表していることを示す。

## 目次

第 1 章 序論	・・・ 1
第 2 章 圧縮を受ける押出型材の耐荷力	・・・ 2
第 3 章 部材断面	・・・ 5
第 4 章 有限要素法による弾塑性有限変位解析	・・・ 8
4.1 応力-ひずみ関係	・・・ 8
4.2 境界条件	・・・ 8
4.3 初期たわみと残留応力	・・・ 10
4.4 要素分割	・・・ 10
第 5 章 耐荷力曲線と解析結果の比較	・・・ 13
第 6 章 結論	・・・ 15
参考文献	・・・ 16
付録 A Eurocode 9 の耐荷力式と AA の座屈強度式	・・・ 17
付録 B 図 5.1 の数値データ	・・・ 19

## 第1章 序論

アルミニウム合金はこれまで橋の高欄や道路の防護柵など付属品的な用途以外に土木構造物の主要な部材として用いられることはほとんどなかった。しかし耐食性に優れ、軽量であることから、2000年頃から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り<sup>1),2)</sup>、2011年には道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋が建設された<sup>3)</sup>。

アルミニウム合金土木構造物の設計と製作は、日本アルミニウム協会が1998年に発行したアルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案<sup>4)</sup>（以後、JAA指針と呼ぶ）に基づいて行われている。この指針は、1977年に発行された指針を焼き直ししたものであり、設計の基本はほとんど変わっていない。これに対して、米国では、米国アルミニウム協会が定めたアルミニウム構造物の設計基準<sup>5)</sup>（以後、AA基準と呼ぶ）がAASHTOに導入され、欧州では、Eurocode 9<sup>6)</sup>にアルミニウム構造の設計が規定された。

前述のように、アルミニウム合金が土木構造物の主要な部材に用いられようになってきたが、設計基準は旧いままである。このような状況で、最新の研究成果および知見を取り入れた新しい設計基準を作成して欲しいとの要望が日本アルミニウム協会から土木学会にあり、同学会の鋼構造委員会の下にアルミニウム合金土木構造物設計・製作指針作成検討小委員会が2012年9月から2015年3月にかけて設置された。

本研究は、同指針の押出型材の許容軸方向圧縮応力度に関する規定を起草する基となる、圧縮を受ける押出型材の耐荷力を与えることを目的とする。

## 第2章 圧縮を受ける押出型材の耐荷力

圧縮を受ける平板部材の耐荷力が次式で与えられている<sup>7)</sup>.

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_1) \\ Q_1\lambda^4 + Q_2\lambda^3 + Q_3\lambda^2 + Q_4\lambda + Q_5 & (\lambda_1 \leq \lambda \leq 2) \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{r} \quad (2.2)$$

ここに、 $\sigma_u$  : 圧縮を受ける平板部材の耐荷力

$\lambda$  : 細長比パラメータ

$\sigma_{0.2}$  : アルミニウム合金の0.2%耐力

$E$  : アルミニウム合金のヤング率 (= 70 GPa)

$l$  : 部材の有効座屈長

$r$  : 部材の断面二次半径

$\lambda_1$  : 定数

$Q_1 \sim Q_5$  : 係数

アルミニウム合金 A6061-T6, A6005C-T5, A5083-O に対する  $\lambda_1$  と  $Q_1 \sim Q_5$  の値を表 2.1 に示す.

表 2.1  $\lambda_1$  と  $Q_1 \sim Q_5$  の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\lambda_1$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$
A6061-T6	245	0.13	0.05	-0.04	-0.30	-0.03	1.01
A6005C-T5	175						
A5083-O	127	0.09	-0.14	0.72	-1.13	0.10	1.00

式(2.1)が与える耐荷力は、図 2.1 に示すように、幅中央の位置（破線で表示）で鉛直方向の変位が拘束された平板部材が、圧縮を受けて水平方向に座屈する場合に対する耐荷力である。部材長に対して 1/1000 の最大初期たわみが、平板部材の水平方向に考慮されている。摩擦攪拌接合または溶接による残留応力は考慮されていない。

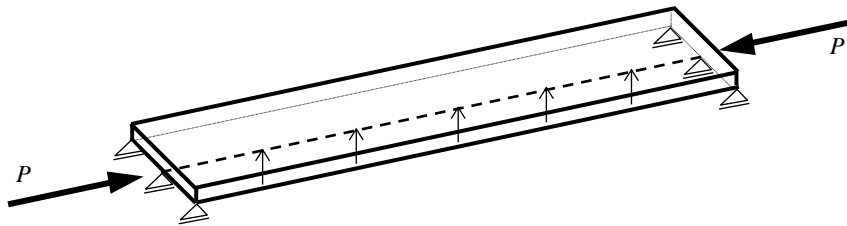
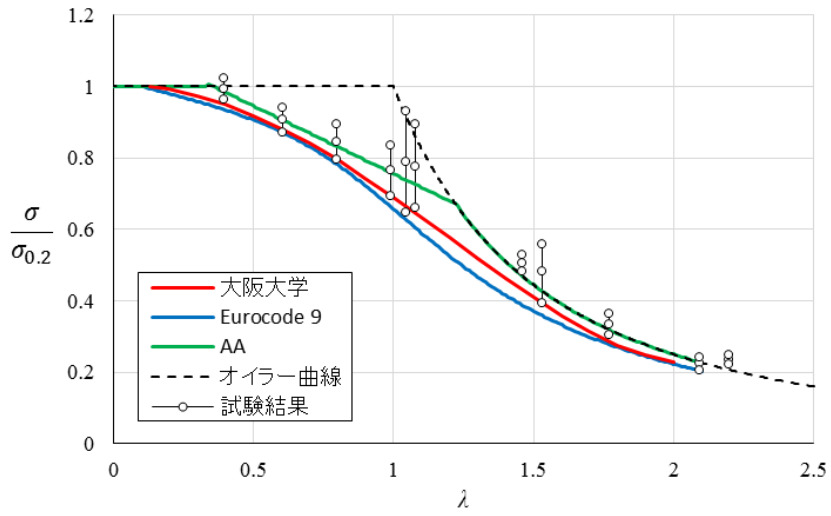


図 2.1 圧縮を受ける平板部材

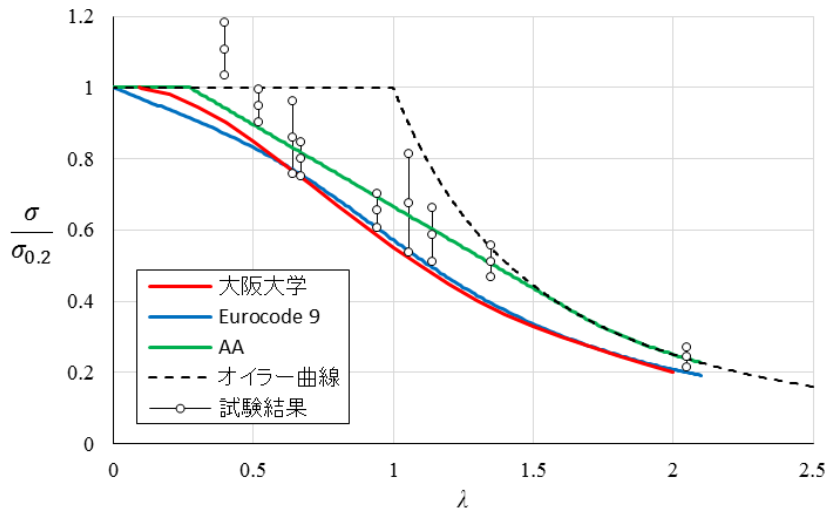
式(2.1)が与える耐荷力曲線（以後、これを大阪大学の耐荷力曲線と呼ぶ）、Eurocode 9<sup>6)</sup>の耐荷力曲線、AA<sup>5)</sup>の座屈強度曲線の比較を図 2.2 に示す。6000 系アルミニウム合金および 5000 系アルミニウム合金の試験値<sup>8)</sup>が、それぞれ図 2.2(a)と(b)に記載されている。試験値は、圧縮を受ける二軸対称の I 型断面の押出形材が弱軸回りに座屈する場合に対する耐荷力である。細長比パラメータ  $\lambda$  の一つの値に対して 9 体以上の試験結果の平均値および平均値  $\pm 2 \times$  標準偏差の値が各図にプロットされている。Eurocode 9 の耐荷力曲線および AA の座屈強度曲線を与える式を付録 A に示す。Eurocode 9 では、圧縮を受けるアルミニウム合金部材の耐荷力の評価式として Perry-Robertson 式が採用されている。

図 2.2(a)と(b)の各図から分かるように、AA の座屈強度曲線は、大阪大学と Eurocode 9 の耐荷力曲線より高い位置にある。図 2.2(a)に示すように、6000 系アルミニウム合金に対して、大阪大学の耐荷力曲線は、平均値  $-2 \times$  標準偏差の試験値の近傍を通過する。Eurocode 9 では、6000 系のみならず 2000 系と 7000 系のアルミニウム合金の試験結果も含めて、平均値  $-2 \times$  標準偏差の試験値の近傍を通過するように耐荷力曲線が設定されている<sup>9)</sup>。したがって、Eurocode 9 の耐荷力曲線は大阪大学の耐荷力曲線より幾分低い位置を通過する。

図 2.2(b)に示すように、5000 系アルミニウム合金に対して、細長比パラメータ  $\lambda$  が 0.5 以下の範囲を除いて、大阪大学と Eurocode 9 の耐荷力曲線は互いに近く、両者は、平均値  $-2 \times$  標準偏差の試験値の近傍を通過する。



(a) 6000系アルミニウム合金



(b) 5000系アルミニウム合金

図 2.2 大阪大学, Eurocode 9, AA の耐荷力曲線の比較

### 第3章 部材断面

大阪大学の耐荷力曲線は、平板部材が、圧縮を受けて水平方向に座屈する場合に対する耐荷力を与える。したがって、大阪大学の耐荷力曲線が、圧縮を受ける I 型断面部材および箱型断面部材に対してそれらの耐荷力を表しているかどうかを調べる必要がある。

本研究では、2 軸対称の I 型断面の押出形材および箱型断面の押出形材を取り扱う。摩擦撹拌接合または溶接によって製作された組立部材は扱わない。

押出形材の断面の高さと幅は、押出ダイスの寸法制限を受け、現在、我国で製造できる I 型断面および箱型断面の押出形材の最大高さおよび最大幅は約 250mm である<sup>10)</sup>。したがって、I 型断面と箱型断面の高さと幅をそれぞれ 250mm とする。

I 型断面の押出形材のフランジの片側を、圧縮を受ける自由突出板とみなすと、アルミニウム合金の自由突出板が 0.2% 耐力  $\sigma_{0.2}$  を維持する限界の幅厚比が次式で与えられる。

$$\beta_{f1} = \pi \sqrt{\frac{0.425}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} R_{f1} \quad (3.1)$$

ここに、 $\beta_{f1}$  : アルミニウム合金の自由突出板が 0.2% 耐力  $\sigma_{0.2}$  を維持する限界の幅厚比の値

$R_{f1}$  : アルミニウム合金の自由突出板が 0.2% 耐力  $\sigma_{0.2}$  を維持する限界の幅厚比パラメータの値

$\mu$  : ポアソン比 (= 0.3)

他方、I 型断面の押出形材のウェブおよび箱型断面の押出形材のウェブとフランジを、圧縮を受ける両縁支持板とみなすと、アルミニウム合金の両縁支持板が 0.2% 耐力  $\sigma_{0.2}$  を維持する限界の幅厚比が次式で与えられる。

$$\beta_{w1} = \pi \sqrt{\frac{4}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} R_{w1} \quad (3.2)$$

ここに、 $\beta_{w1}$  : アルミニウム合金の両縁支持板が 0.2% 耐力  $\sigma_{0.2}$  を維持する限界の幅厚比の値

$R_{w1}$  : アルミニウム合金の両縁支持板が 0.2% 耐力  $\sigma_{0.2}$  を維持する限界の幅厚比パラメータの値

アルミニウム合金 A6061-T6, A6005C-T6, A5083-O に対する  $\sigma_{0.2}$ ,  $R_{f1}$  と  $\beta_{f1}$ ,  $R_{w1}$  と  $\beta_{w1}$  の値を表 3.1 に示す。 $R_{f1}$  と  $R_{w1}$  の値は、既往の研究<sup>11),12)</sup>により与えられた値を採用している。



表 3.1  $\sigma_{0.2}$ ,  $R_{f1}$  と  $\beta_{f1}$ ,  $R_{w1}$  と  $\beta_{w1}$  の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	自由突出板		両縁支持板	
		$R_{f1}$	$\beta_{f1}$	$R_{w1}$	$\beta_{w1}$
A6061-T6	245	0.60	6.28	0.52	16.71
A6005C-T6	175		7.43		19.77
A5083-O	127	0.40	5.82	0.44	19.64

図 3.1 を参照して、2 軸対称の I 型断面および箱型断面を構成する板要素の限界の幅厚比  $\beta_{f1}$  および  $\beta_{w1}$  が次のように与えられる。

$$\text{I 型断面} \quad \text{フランジ} : \beta_{f1} = \frac{b_1}{t_1} = \frac{B-t_2}{2t_1} \quad (3.3)$$

$$\text{ウェブ} : \beta_{w1} = \frac{b_2}{t_2} = \frac{H-2t_1}{t_2} \quad (3.4)$$

$$\text{箱型断面} : \beta_{w1} = \frac{b_3}{t_3} = \frac{B-2t_3}{t_3} \quad (3.5)$$

ここに、 $t_1$  と  $t_2$  : それぞれ、I 型断面のフランジとウェブの板厚

$b_1$  と  $b_2$  : それぞれ、I 型断面のフランジの突出幅とウェブの純幅

$t_3$  と  $b_3$  : それぞれ、箱断面の板厚と純幅

$H$  と  $B$  : それぞれ、I 型断面または箱断面の高さと幅

$H = B = 250\text{mm}$  に対して、表 3.1 の  $\beta_{f1}$  と  $\beta_{w1}$  の値を式(3.3)~(3.5)に代入して算出される板要素の板厚を表 3.2 に示す。さらに、 $H = B = 250\text{mm}$  に対して、表 3.2 に示す板厚を有する I 型断面と箱型断面の断面二次半径を表 3.3 に示す。

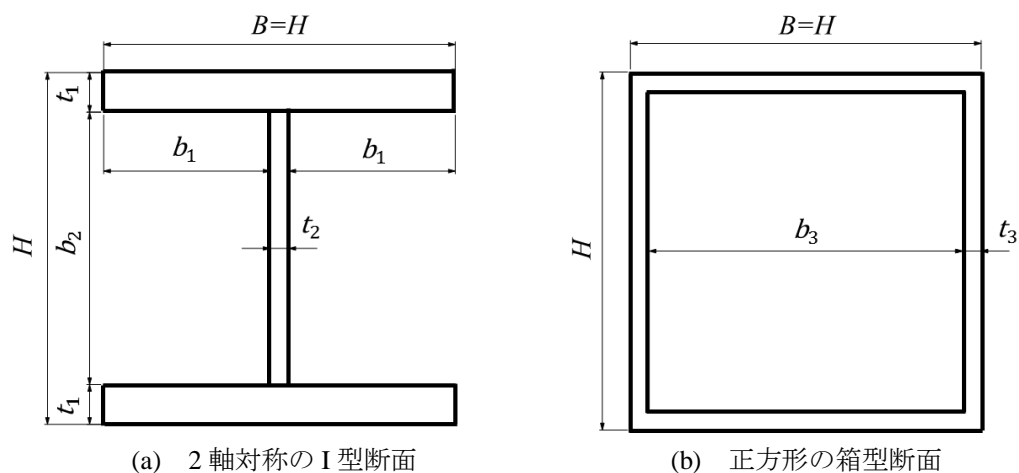


図 3.1 断面形状

表 3.2 板要素の板厚

アルミニウム合金	I型断面		箱型断面 (正方形)
	$t_1$ (mm)	$t_2$ (mm)	$t_3$ (mm)
A6061-T6	18.9	12.7	13.4
A6005C-T6	16.1	11.1	11.5
A5083-O	20.6	10.7	11.6

表 3.3 断面二次半径

アルミニウム合金	I型断面		箱型断面 (正方形) (mm)
	強軸回り (mm)	弱軸回り (mm)	
A6061-T6	106.0	63.7	96.7
A6005C-T6	107.0	63.3	97.5
A5083-O	107.2	65.4	97.4

## 第4章 有限要素法による弾塑性有限変位解析

### 4.1 応力-ひずみ関係

アルミニウム合金材の耐荷力を算出するための応力-ひずみ関係が次式で与えられている<sup>13)</sup>.

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & (\sigma \leq \sigma_{0.2}) \\ \sigma = \sigma_{0.2} & (\sigma_{0.2} \leq \sigma) \end{cases} \quad (4.1)$$

ここに、 $\sigma$ と $\varepsilon$  : それぞれ、応力とひずみ

$E$  : アルミニウム合金のヤング係数 (= 70GPa)

$\sigma_{0.2}$  : アルミニウム合金の 0.2%耐力

$n$  : アルミニウム合金のひずみ硬化パラメータ

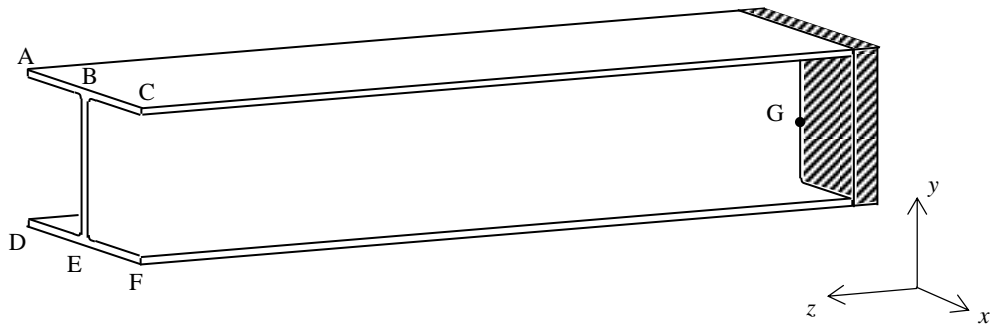
アルミニウム合金 A6061-T6, A6005C-T5, A5083-O に対する 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ およびひずみ硬化パラメータ $n$ の値を表 4.1 に示す. 0.2%耐力に対して JAA 指針<sup>4)</sup>で規定される値を用いる. ひずみ硬化パラメータ $n$ の値は, 引張試験の結果に確率統計学的処理が施され, 非超過確率 5%に対する値である<sup>13)</sup>.

表 4.1 0.2%耐力とひずみ硬化パラメータの値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$n$
A6061-T6	245	29.1
A6005C-T5	175	29.1
A5083-O	127	5.3

### 4.2 境界条件

圧縮を受ける I 型断面および箱型断面の押出型材に対する境界条件をそれぞれ図 4.1 と 4.2 に示す. 押出型材の左端に対称性の境界条件を設け, 右端に剛板を取り付け, 剛板の中央の点 G を z 軸方向に強制変位させることによって, 押出型材に圧縮荷重を与える.



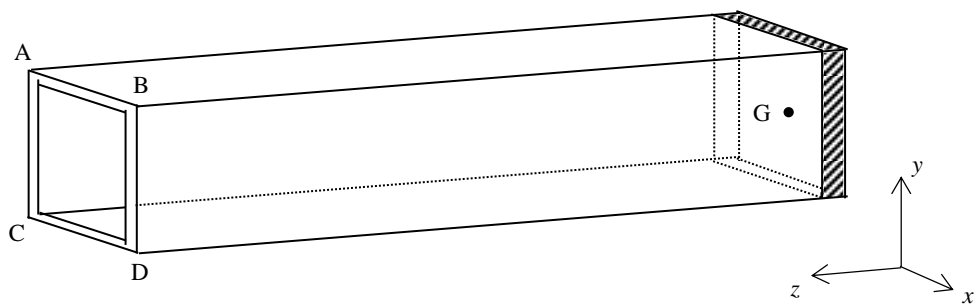
(a) 弱軸回り

	$u$	$v$	$w$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
辺 AC と DF	—	—	固定	—	固定	—
辺 BE	—	固定	固定	固定	—	—
点 G	固定	固定	強制変位	固定	—	固定

(b) 強軸回り

	$u$	$v$	$w$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
辺 AC と DF	固定	—	固定	—	固定	—
辺 BE	—	—	固定	固定	—	—
点 G	固定	固定	強制変位	—	固定	固定

図 4.1 I 型断面の押出形材に対する境界条件



	$u$	$v$	$w$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
辺 AB と CD	—	—	固定	—	固定	—
辺 AC と BD	—	固定	固定	固定	—	—
点 G	固定	固定	強制変位	固定	—	固定

図 4.2 箱型断面の押出形材に対する境界条件

### 4.3 初期たわみと残留応力

押出型材に対して、次式で与えられる初期たわみを仮定する.

$$\text{I型断面} \quad \text{弱軸回りに対して,} \quad u_0 = \frac{l}{1000} \sin \frac{\pi z}{l} \quad (4.2)$$

$$\text{強軸回りに対して,} \quad v_0 = \frac{l}{1000} \sin \frac{\pi z}{l} \quad (4.3)$$

$$\text{箱型断面} \quad u_0 = \frac{l}{1000} \sin \frac{\pi z}{l} \quad (4.4)$$

ここに,  $u_0$  : 部材の  $x$  軸方向の初期たわみ

$v_0$  : 部材の  $y$  軸方向の初期たわみ

$l$  : 押出型材の長さ

式(4.4)の  $l/1000$  は, JAA 指針<sup>4)</sup>で規定される, 圧縮を受ける部材の最大初期たわみである.

押出型材に生じる残留応力は非常に小さいことが示されているので<sup>8),14)</sup>, 解析において残留応力を考慮しない.

### 4.4 要素分割

圧縮を受ける部材の弾塑性有限変位解析には汎用有限要素プログラム MARC<sup>15)</sup>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) を使用する. 有限要素法解析における, 図 4.1 と 4.2 の右端の剛板の取り扱いに関しては, 本節の最後で述べる.

耐荷力と幅方向の要素分割数の関係を表 4.2 に示す. これは, A6061-T6 の I 型断面の押出型材に対する結果である.  $\sigma_u$  は, 有限要素解析において, 図 4.1 の点 G に生じる反力の最大値を断面積で除して得られる値である. 図 4.3 に示すように, フランジの幅方向およびウェブの幅方向ともに等分割で, 4, 8, 12 の 3 種類の要素分割を考慮する. 長手方向の要素分割は, 1 要素について, 幅方向の長さに対する長手方向の長さが 0.9 から 1.1 になるように長手方向を等分割する. 表 4.2 から分かるように, 弱軸回りと強軸回りとともに,  $\lambda$  の各値に対して  $\sigma_u / \sigma_{0.2}$  は同じ値をとる. したがって, 要素分割は, 幅方向に 4 分割 [図 4.3(a) 参照] で十分であるといえるが, 8 分割 [図 4.3(b) 参照] を採用する. 図 4.4 に示すように, 箱型断面の押出型材の要素分割は, フランジとウェブの幅をそれぞれ 8 等分割し, 長手方向の要素分割は, I 型断面の押出型材と同様にする.

有限要素法解析における, 図 4.1 と 4.2 の右端の剛板の取り扱いに関しては, 図 4.3(b) の幅方向の要素分割数が 8 に対して, 右端の板の板厚を 25mm とし, ヤング率を  $70 \times 100$  GPa,  $70 \times 1000$  GPa,  $70 \times 10000$  GPa の 3 種類に対して計算を行った結果, 計算結果に違いがなかったの  
で, 板厚 25mm, ヤング率  $70 \times 1000$  GPa の板で剛板を実現している.

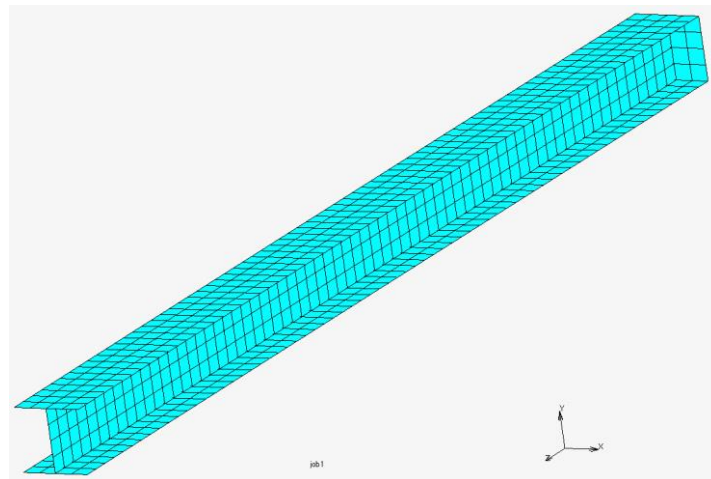
表 4.2 耐荷力と要素分割数の関係

(a) 弱軸回り

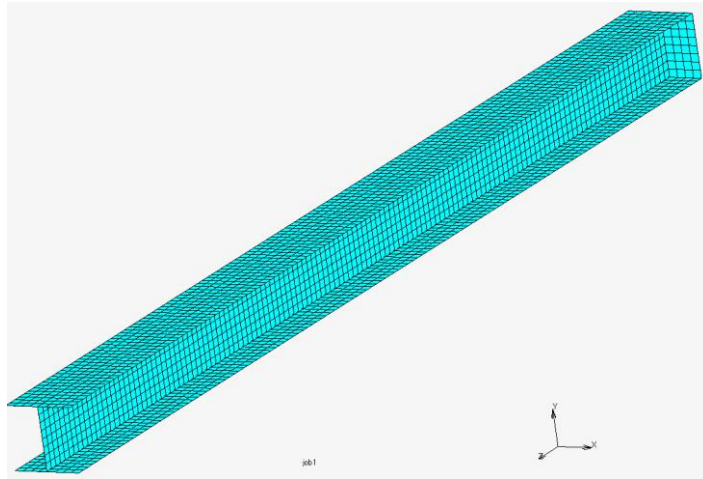
$\lambda$	$\sigma_u / \sigma_{0.2}$		
	幅方向の要素分割数		
	4	8	12
0.52	0.938	0.938	0.938
1.03	0.691	0.691	0.691
1.48	0.408	0.408	0.408

(b) 強軸回り

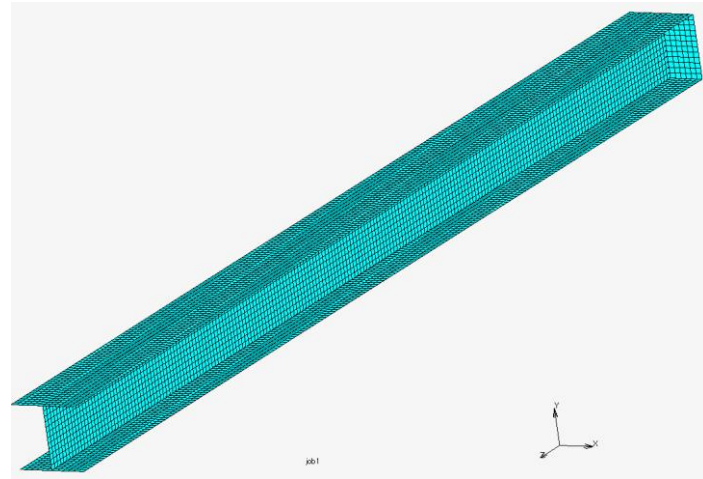
$\lambda$	$\sigma_u / \sigma_{0.2}$		
	幅方向の要素分割数		
	4	8	12
0.53	0.923	0.923	0.923
1.02	0.725	0.725	0.725
1.51	0.409	0.409	0.409



(a) 4分割



(b) 8 分割



(c) 12 分割

図 4.3 I 型断面の押出型材の要素分割 (強軸回り  $\lambda = 1.51$ )

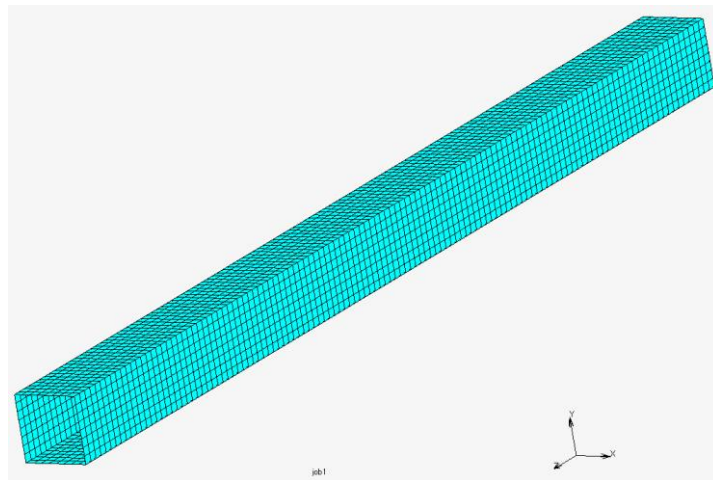
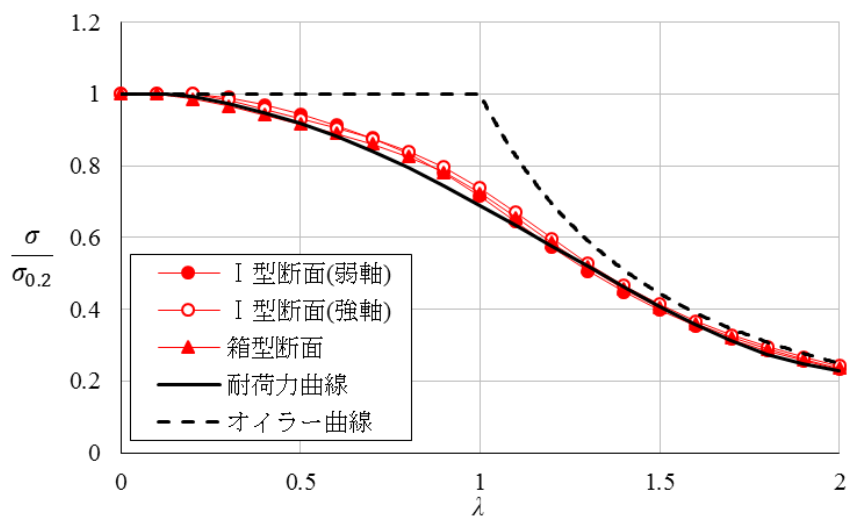


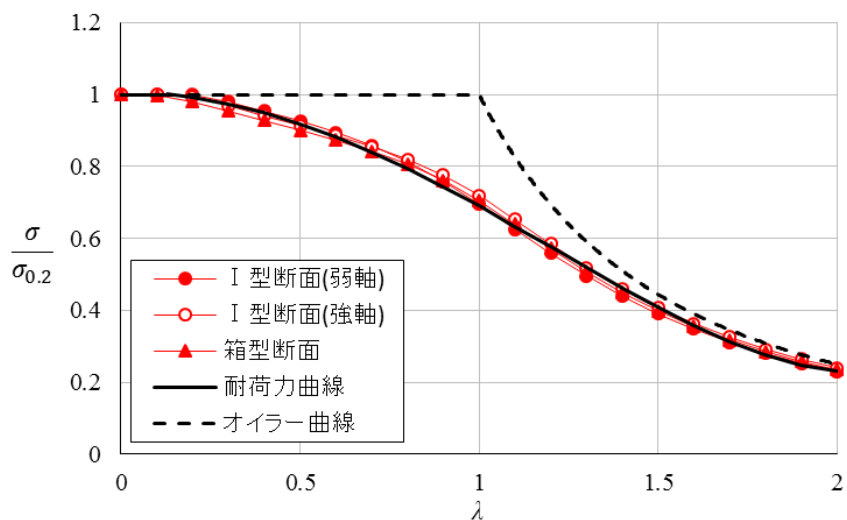
図 4.4 箱型断面の押出型材の要素分割 ( $\lambda = 1.5$ )

## 第5章 耐力力曲線と解析結果の比較

大阪大学の耐力力曲線と解析結果の比較を図 5.1 に示す。解析結果の数値データを付録 B に示す。図 5.1 から分かるように、A6061-T6, A6005C-T5, A5083-O の各場合とも、大阪大学の耐力力曲線を若干下回る解析結果が存在するが、大阪大学の耐力力曲線は、解析結果の近傍を通過する。したがって大阪大学の耐力力曲線は、圧縮を受ける I 型断面および箱型断面の押出型材の耐力力を表しているといえる。

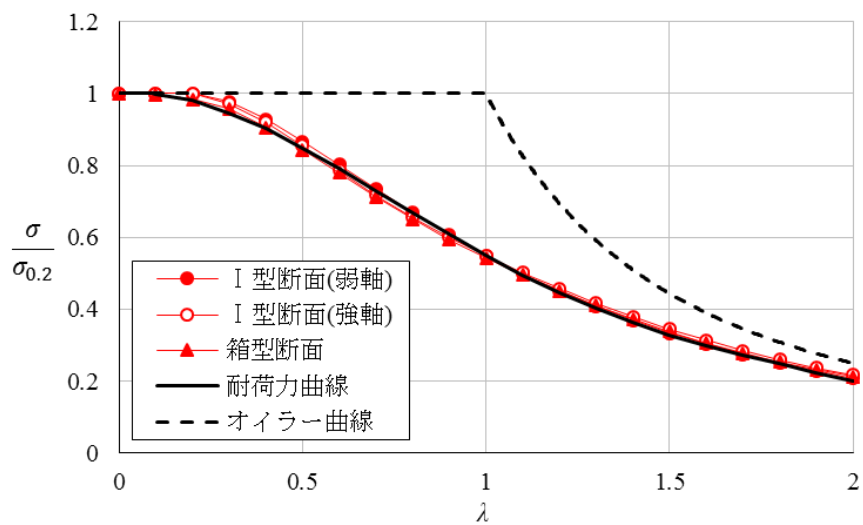


(a) A6061-T6



(b) A6005C-T5





(c) A5083-O

図 5.1 大阪大学の耐荷力曲線と解析結果の比較

## 第6章 結論

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得られた解析結果との比較により,ALST 研究レポート No.36<sup>7)</sup>で与えられた,圧縮を受ける平板部材の耐荷力曲線 [式(2.1)] が,圧縮を受ける2軸対称のI型断面の押出形材および箱型断面の押出形材の耐荷力を表していることを示した.

## 参考文献

- 1) 土木学会 平成 22 年度全国大会 研究討論会 研-06 資料：21 世紀の建設材料 アルミニウム合金の可能性, 2010.
- 2) 土木学会 鋼構造委員会 アルミニウム合金材の鋼橋への適用検討小委員：アルミニウム合金材の鋼橋への適用に関する調査報告書, 2014.
- 3) 蒲原ケミカル橋. <http://alst.jp/str/bridge/kanbara.htm>
- 4) 日本アルミニウム協会 (旧軽金属協会)：アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案 (第 1 次改訂試案), 1998.
- 5) Aluminum Association : Aluminum Design Manual, Part I, Specification for Aluminum Structures, 2010.
- 6) Eurocode 9: Design of aluminum structures – Part 1-1: General structural rules, 2007.
- 7) 西森文子, 大倉一郎：アルミニウム合金桁の横倒れ耐荷力, ALST 研究レポート, No.36, 2014.
- 8) F.M. Mazzolani: Aluminum Alloy Structures: Second edition, E & FN Spon, 1995.
- 9) ISO/TR 11069 : Aluminium structures – Material and design – Ultimate limit states under static loading, 1995
- 10) 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)
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 大倉一郎, 佐藤純：摩擦攪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.
- 15) MSC.Software Corporation: Marc Mentat 2013.0.0.

## 付録 A Eurocode 9 の耐荷力式と AA の座屈強度式

Eurocode 9 の耐荷力は次式で与えられる.

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda \geq \lambda_0) \\ \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} & (\lambda < \lambda_0) \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

$$\phi = 0.5 \{ 1 + \alpha(\lambda - \lambda_0) + \lambda^2 \} \quad (\text{A.2})$$

ここに,  $\sigma_u$  : 圧縮を受ける部材の耐荷力

$\sigma_{0.2}$  : 0.2%耐力

$\lambda$  : 細長比パラメータ

$\lambda_0$  : 耐荷力曲線が  $\sigma_u / \sigma_{0.2} = 1.0$  に交差する細長比パラメータの値

$\alpha$  : 定数

$\lambda_0$  と  $\alpha$  の値を表 A.1 に示す.

表 A.1  $\lambda_0$  と  $\alpha$  の値

アルミニウム合金	$\lambda_0$	$\alpha$
2000 系, 6000 系, 7000 系	0.10	0.20
5000 系	0.00	0.32

AA の座屈強度式は次式で与えられる.

6000 系に対して,

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} B(1 - \frac{\pi\sqrt{B}}{10}\lambda) \leq 1 & (\lambda \leq S) \\ \frac{1}{\lambda^2} & (S \leq \lambda) \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

5000 系に対して,

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} B(1 - \frac{\pi\sqrt{6B}}{20}\lambda) \leq 1 & (\lambda \leq S) \\ \frac{1}{\lambda^2} & (S \leq \lambda) \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

ここに,  $\sigma_{cr}$  : 圧縮を受ける部材の座屈強度

$B$  と  $S$  の値を表 A.2 に示す.

表 A.2  $B$  と  $S$  の値

アルミニウム合金	$B$	$S$
6000 系	$1 + \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{15510}}$ ( $\sigma_{0.2}$ の単位 : MPa)	$\frac{4.1}{\pi\sqrt{B}}$
5000 系	$1 + \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{6900}}$ ( $\sigma_{0.2}$ の単位 : MPa)	$\frac{20\sqrt{6}}{9\pi\sqrt{B}}$

付録B 図5.1の数値データ

(a) 図5.1(a) (A6061-T6)

$\lambda$	$\sigma/\sigma_{0.2}$		
	I型断面 (弱軸回り)	I型断面 (強軸回り)	箱型断面
0.1	1.000	1.000	1.000
0.2	1.000	1.000	0.986
0.3	0.991	0.983	0.966
0.4	0.969	0.958	0.942
0.5	0.943	0.931	0.916
0.6	0.913	0.904	0.890
0.7	0.878	0.875	0.860
0.8	0.835	0.840	0.825
0.9	0.781	0.796	0.781
1	0.715	0.739	0.724
1.1	0.643	0.670	0.656
1.2	0.573	0.597	0.585
1.3	0.506	0.528	0.517
1.4	0.448	0.467	0.457
1.5	0.397	0.413	0.405
1.6	0.354	0.368	0.360
1.7	0.317	0.329	0.322
1.8	0.285	0.296	0.290
1.9	0.257	0.267	0.261
2	0.233	0.242	0.237

(b) 図 5.1(b) (A6005C-T5)

$\lambda$	$\sigma/\sigma_{0.2}$		
	I 型断面 (弱軸回り)	I 型断面 (強軸回り)	箱型断面
0.1	1.000	1.000	0.997
0.2	1.000	0.994	0.980
0.3	0.980	0.969	0.955
0.4	0.955	0.941	0.928
0.5	0.926	0.913	0.901
0.6	0.895	0.886	0.873
0.7	0.858	0.856	0.843
0.8	0.814	0.821	0.807
0.9	0.759	0.776	0.762
1	0.694	0.720	0.705
1.1	0.626	0.654	0.640
1.2	0.559	0.585	0.572
1.3	0.496	0.519	0.508
1.4	0.440	0.459	0.449
1.5	0.391	0.408	0.399
1.6	0.349	0.363	0.356
1.7	0.312	0.325	0.318
1.8	0.281	0.293	0.286
1.9	0.254	0.264	0.259
2	0.230	0.240	0.235

(c) 図 5.1(c) (A5083-O)

$\lambda$	$\sigma/\sigma_{0.2}$		
	I 型断面 (弱軸回り)	I 型断面 (強軸回り)	箱型断面
0.1	1.000	1.000	1.000
0.2	1.000	1.000	0.997
0.3	1.000	1.000	0.984
0.4	0.978	0.972	0.958
0.5	0.928	0.921	0.906
0.6	0.867	0.855	0.844
0.7	0.802	0.786	0.779
0.8	0.735	0.717	0.713
0.9	0.669	0.656	0.651
1	0.607	0.600	0.594
1.1	0.550	0.549	0.543
1.2	0.499	0.502	0.495
1.3	0.452	0.458	0.451
1.4	0.409	0.417	0.411
1.5	0.370	0.380	0.373
1.6	0.335	0.345	0.339
1.7	0.304	0.314	0.306
1.8	0.274	0.285	0.279
1.9	0.250	0.260	0.254
2	0.229	0.238	0.233