

圧縮を受けるアルミニウム合金部材の
全体と局部の連成耐荷力

ALST 研究レポート 57

2020 年 2 月

大阪大学大学院工学研究科

高畑皇，大倉一郎

概要

本研究では、圧縮を受けるアルミニウム合金部材の全体と局所の連成耐荷力の評価法として、米国のアルミニウム協会が制定したアルミニウム構造物の設計基準で採用されている方法と欧州のアルミニウム構造物の設計基準 Eurocode 9 で採用されている Q ファクター法のうち、どちらの方法が優れているかを明らかにする。取り扱うアルミニウム合金部材は、箱型断面、I 型断面ならびに縦補剛された箱型断面および I 型断面の部材である。これらの部材に対して有限要素法による弾塑性有限変位解析を行い、解析結果と前述の二つの評価方法とを比較することによって、どちらが優れているか検討する。

目次

第 1 章 序論	・・・1
第 2 章 既往の連成耐荷力評価	・・・3
第 3 章 圧縮を受ける箱型断面部材の連成耐荷力	・・・5
3.1 応力-ひずみ関係	・・・5
3.2 解析対象と境界条件	・・・6
3.3 初期たわみ	・・・7
3.4 要素分割	・・・9
3.5 箱型断面の形状	・・・10
3.6 Q の値	・・・12
3.7 連成耐荷力の評価	・・・16
第 4 章 圧縮を受ける I 型断面部材の連成耐荷力	・・・25
4.1 解析対象と境界条件	・・・25
4.2 初期たわみ	・・・26
4.3 要素分割	・・・27
4.4 I 型断面の形状	・・・27
4.5 Q の値	・・・29
4.6 連成耐荷力の評価	・・・31
第 5 章 縦補剛された圧縮部材の連成耐荷力	・・・35
5.1 縦補剛された圧縮部材の断面形状	・・・35
5.2 解析対象と境界条件	・・・37
5.3 初期たわみ	・・・38
5.4 要素分割	・・・39
5.5 Q の値	・・・40
5.6 連成耐荷力の評価	・・・43
5.7 縦補剛部材と無補剛部材の連成耐荷力の比較	・・・44
第 6 章 結論	・・・47
参考文献	・・・49

第1章 序論

アルミニウム合金は耐食性に優れ、軽量であることから、2000年頃から、**図 1.1** に示すようなアルミニウム歩道橋が建設されるようになり、2003年には、**図 1.2** に示す歩行者用アルミニウム床版が、既設のコンクリート床版の取換え床版として道路橋の歩道部に架設された¹⁾。2011年には、**図 1.3** に示すような道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋が建設され²⁾、2015年には、巨大津波により流出する道路橋対策として開発された緊急仮設橋の床版に**図 1.4** に示すアルミニウム床版が採用された³⁾。さらに、2016年には、港の栈橋の老朽化したコンクリート床版の取替え床版として、**図 1.5** に示すアルミニウム床版が導入された⁴⁾。



図 1.1 アルミニウム歩道橋



図 1.2 歩行者用アルミニウム床版



図 1.3 道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋



図 1.4 アルミニウム床版が採用された緊急仮設橋



図 1.5 棧橋の取換え床版として導入されたアルミニウム床版

他方、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針(案)⁵⁾が 2015 年に制定された。この指針では 2 軸対称断面の押出型材に対して許容軸方向圧縮応力度が規定されたが、全体と局部の連成効果が考慮されていなかった。その後、同指針の改訂試案⁶⁾が発表されたが、ここでは、圧縮部材の全体と局部の連成効果に対して、全体座屈に対する耐荷力に局部座屈に対する耐荷力を掛ける積公式が採用されている。

次章で述べるように、連成耐荷力の評価式として、米国のアルミニウム協会が制定したアルミニウム構造物の設計基準⁷⁾では、前述の積公式に類似した評価式が採用されている。他方、欧州のアルミニウム構造物の設計基準 Eurocode 9⁸⁾では、連成耐荷力の評価法は Q ファクター法によってなされる。

このような状況で、本研究は、圧縮を受けるアルミニウム合金部材の全体と局部の連成耐荷力の評価法としてどちらの方法が優れているかを明らかにすることを目的とする。取り扱うアルミニウム合金部材は、箱型断面、I 型断面ならびに縦補剛された箱型断面および I 型断面の部材である。これらの部材に対して有限要素法による弾塑性有限変位解析を行い、解析結果と前述の二つの連成耐荷力の評価式とを比較することによって、どちらが優れているか検討する。

第2章 既往の連成耐荷力評価

米国のアルミニウム協会が制定したアルミニウム構造物の設計基準⁷⁾(以後 AA 基準と呼ぶ)においては、圧縮を受ける部材の全体と局部の連成耐荷力は次式で評価される。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} \left(\frac{\sigma_{lu}}{\sigma_{0.2}}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sigma_{gu}}{\sigma_{0.2}}\right)^{\frac{1}{3}} & \left(\frac{\sigma_{gu}}{\sigma_{0.2}} \geq \frac{\sigma_{lu}}{\sigma_{0.2}}\right) \\ \frac{\sigma_{gu}}{\sigma_{0.2}} & \left(\frac{\sigma_{gu}}{\sigma_{0.2}} < \frac{\sigma_{lu}}{\sigma_{0.2}}\right) \end{cases} \quad (2.1)$$

ここに、 σ_u : 圧縮部材の全体と局部の連成耐荷力
 σ_{lu} : 圧縮部材の局部座屈に対する耐荷力
 σ_{gu} : 圧縮部材の全体座屈に対する耐荷力
 $\sigma_{0.2}$: アルミニウム合金材の 0.2%耐力

AA 基準においては、 σ_{lu} に対して、部材を構成する板要素の局部座屈に対する耐荷力の中で、最も小さいものを使用することが規定されている。式(2.1)は、箱型断面、I 型断面、T 型断面の部材の圧縮耐荷力の実験結果に基づいて作成された実験公式である⁹⁾。

欧州のアルミニウム構造物の設計基準 Eurocode⁹⁾においては、全体と局部の連成耐荷力は次式で与えられる Q ファクター法で評価される。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = Qf(\sqrt{Q}\lambda) \quad (2.2)$$

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{r} \quad (2.3)$$

ここに、 $f(\lambda)$: 圧縮部材の全体座屈に対する耐荷力を与える関数
 Q : 0.2%耐力で無次元表示された短柱の圧縮耐荷力
 λ : 圧縮部材の細長比パラメータ
 E : 圧縮部材のヤング率
 l : 圧縮部材の有効座屈長
 r : 圧縮部材の断面の回転半径

関数 $f(\lambda)$ は単調減少関数で、かつ $Q \leq 1.0$ であるから式(2.2)は次の関係を有する。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} \geq Qf(\lambda) \quad (2.4)$$

$f(\lambda)$ は圧縮部材の全体座屈に対する耐荷力を与える関数そのものであるから、 $f(\lambda) = \sigma_{gu}/\sigma_{0.2}$ である。したがって、圧縮部材の全体と局部の連成耐荷力の評価式として次の積公式を得る。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = Q \frac{\sigma_{gu}}{\sigma_{0.2}} \quad (2.5)$$

前述の説明から、積公式が与える連成耐荷力は、式(2.2)の Q ファクター法が与える連成耐荷力より常に低い。したがって、次章以下で、圧縮部材の有限要素法による弾塑性有限変位解析の結果と既往の連成耐荷力の評価式とを比較する際、積公式を除く。

我が国の道路橋示方書¹⁰⁾では、圧縮を受ける部材の全体と局部の連成耐荷力に対して積公式が採用され、 Q に対して、部材を構成する板要素の局部座屈に対する耐荷力が用いられる。しかし、部材を構成する板要素のどの板要素の耐荷力を採用すべきか規定されていない。実際の設計においては、部材を構成する板要素の中で最小の耐荷力を与える板要素の値が用いられている。

第3章 圧縮を受ける箱型断面部材の連成耐荷力

3.1 応力-ひずみ関係

有限要素法による弾塑性有限変位解析によって、圧縮を受ける箱型断面部材の耐荷力を算出する。有限要素法解析で用いるアルミニウム合金材の応力-ひずみ関係に対して、次式で与えられる関係を使用する¹¹⁾。

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

ここに、 σ と ε : 応力とひずみ

n : ひずみ硬化パラメータ

$\sigma_{0.2}$: アルミニウム合金材の0.2%耐力

アルミニウム合金としてA6061-T6とA5083-Oを考慮する。これらのアルミニウム合金の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3.1に示す。 $\sigma_{0.2}$ の値は、日本産業規格で規定される値であり^{12),13)}、 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¹¹⁾。式(3.1)が与える応力-ひずみ関係を図3.1に示す。0.2%耐力に近づくに従って、A5083-Oの曲線の曲がる程度がA6061-T6のそれより大きくなる。

表 3.1 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
A5083-O	125	5.3

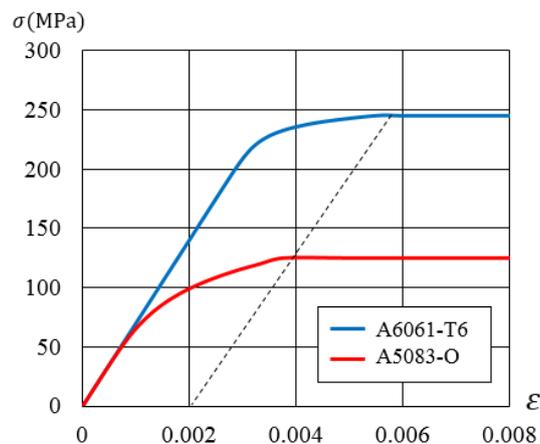


図 3.1 応力-ひずみ関係

3.2 解析対象と境界条件

解析対象は両端が単純支持された，圧縮を受ける箱型断面部材である．図 3.2 に示すように，部材の中央に対称性の境界条件を設けることによって部材の右側半分を解析対象とする．部材の右端に剛板を設け，剛板の中心点 I を x 軸方向に強制変位させることによって，部材に圧縮荷重を与える．

部材が z 軸回りと y 軸回りに座屈する場合に対する境界条件を，それぞれ表 3.2(a)，(b) に示す．表中の u ， v ， w は，それぞれ x 軸， y 軸， z 軸方向の変位を表し， θ_x ， θ_y ， θ_z は，それぞれ x 軸回り， y 軸回り， z 軸回りの回転角を表す．点 I の v と w を固定し，さらに，点 I に対して， z 軸回りに座屈する場合には θ_x と θ_y を固定し， y 軸回りに座屈する場合には θ_x と θ_z を固定する．辺 AB，CD，BD，AC に対称性の境界条件を設ける．さらに， z 軸回りに座屈する場合には点 E と F の w を固定し， y 軸回りに座屈する場合には点 G と H の v を固定する．

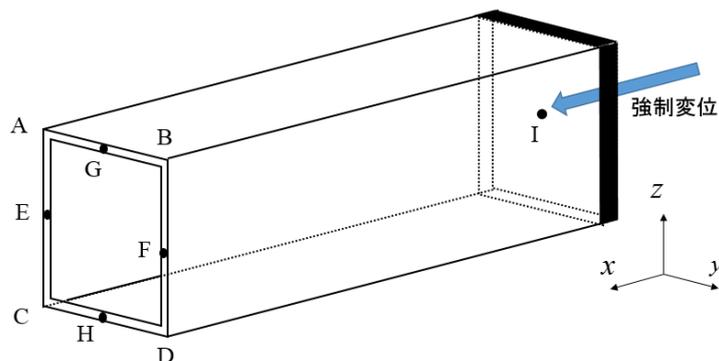


図 3.2 解析モデル

表 3.2 境界条件

(a) z 軸回り

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
点 I	強制変位	固定	固定	固定	固定	-
辺 AC, CD, BD, AB	固定	-	-	-	固定	固定
点 E, F	-	-	固定	-	-	-

(b) y 軸回り

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
点 I	強制変位	固定	固定	固定	-	固定
辺 AC, CD, BD, AB	固定	-	-	-	固定	固定
点 G, H	-	固定	-	-	-	-

3.3 初期たわみ

部材に仮定する初期たわみを z 軸回りに座屈する場合と y 軸回りに座屈する場合に分けて次のように与える.

(a) z 軸回りに座屈する場合,

ウェブ

$$v_0 = v_{0g} + v_{0l} \quad (3.2)$$

$$w_0 = 0 \quad (3.3)$$

フランジ

$$v_0 = v_{0g} \quad (3.4)$$

$$w_0 = w_{0l} \quad (3.5)$$

(b) y 軸回りに座屈する場合,

ウェブ

$$v_0 = v_{0l} \quad (3.6)$$

$$w_0 = w_{0g} \quad (3.7)$$

フランジ

$$v_0 = 0 \quad (3.8)$$

$$w_0 = w_{0g} + w_{0l} \quad (3.9)$$

ここに, v_0, w_0 : それぞれ, y 軸方向と z 軸方向の初期たわみ
 v_{0g}, w_{0g} : それぞれ, y 軸方向と z 軸方向の部材全体の初期たわみ
 v_{0l}, w_{0l} : それぞれ, ウェブとフランジの面外方向の初期たわみ

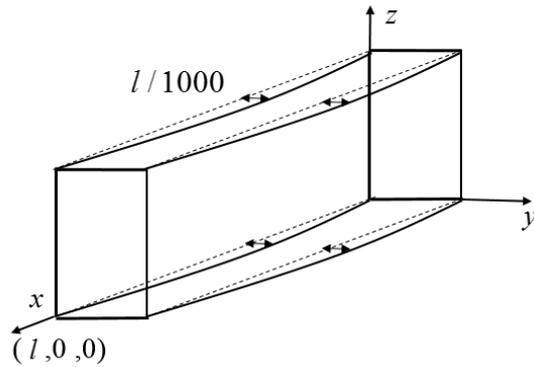
図 3.3 を参照して, 部材全体の初期たわみ v_{0g} と w_{0g} に対して次式を仮定する.

$$v_{0g} = \frac{l}{1000} \sin \frac{\pi x}{l} \quad (3.10)$$

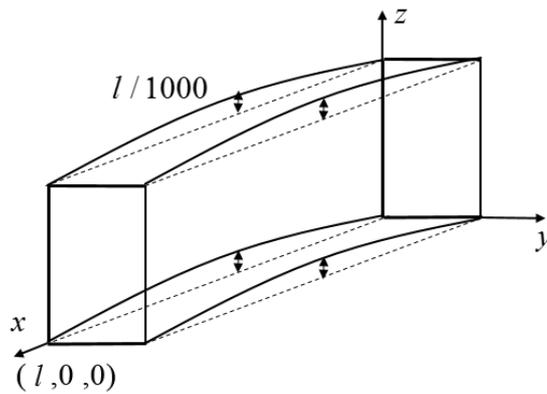
$$w_{0g} = \frac{l}{1000} \sin \frac{\pi x}{l} \quad (3.11)$$

ここに, l : 部材長

式(3.10)と(3.11)の $l/1000$ は, アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針 (案)⁵⁾で規定される, 圧縮部材に許容される最大の初期たわみである.



(a) z軸回り



(b) y軸回り

図 3.3 部材全体の初期たわみ

図 3.4 を参照して、ウェブとフランジの面外方向の初期たわみ v_{0l} と w_{0l} に対して次式を仮定する。

$$v_{0l} = \pm \frac{b_w}{150} \sin\left(\frac{\pi x}{b_w}\right) \sin\left(\frac{\pi z}{b_w + t_f}\right) \quad (3.12)$$

$$w_{0l} = \pm \frac{b_f}{150} \sin\left(\frac{\pi x}{b_w}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_f + t_w}\right) \quad (3.13)$$

ここに、 b_w , t_w : それぞれ、ウェブの板幅と板厚

b_f , t_f : それぞれ、フランジの板幅と板厚

式(3.12)と(3.13)の $b_w/150$ および $b_f/150$ は、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針(案)⁵⁾で規定される、箱桁部材を構成する圧縮板に許容される最大の初期たわみである。式(3.12)と(3.13)の右辺の±は、図 3.4 に示す初期たわみ形状に対応して+か-とする。ウェブ

とフランジの x 軸方向の面外方向の初期たわみ形状に対して，ウェブの板幅 b_w を半波長とする正弦波を与える．

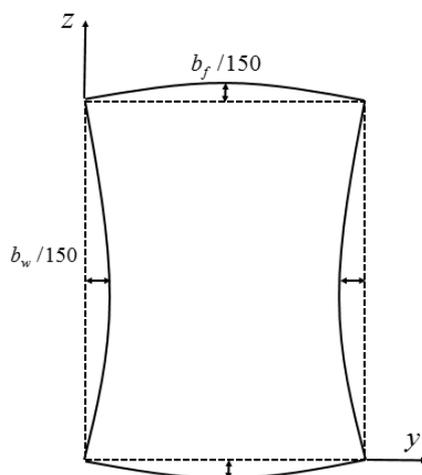


図 3.4 箱型断面部材のウェブとフランジの面外方向の初期たわみ形状

3.4 要素分割

圧縮を受ける箱型断面部材の弾塑性有限変位解析に汎用有限要素解析プログラム MARC¹⁴⁾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．

要素分割が解析精度に及ぼす影響に関して，圧縮を受ける両縁支持板の耐荷力は，板幅方向を 8 等分割すれば十分な精度の解が得られることが明らかにされている¹⁵⁾．そして，圧縮を受ける箱型断面部材の全体座屈に対する耐荷力は，ウェブとフランジの板幅方向をともに 8 等分割すれば十分な精度の解が得られることが明らかにされている¹⁶⁾．したがって，図 3.5 に示すように，有限要素の形状を，一要素の縦辺と横辺の辺長比が 0.9 から 1.1 の間の長方形とし，フランジの板幅方向を 8 等分割する．ウェブの板幅方向の要素分割に関しては，図 3.6 に示すように，箱型断面の高さと幅をそれぞれ H と B とすると， $H/B=1.0$, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.7, 2.0 に対して，それぞれ 8, 9, 10, 10, 11, 12, 14, 16 等分割する．

箱型断面部材の右端に設ける剛板に対して，ヤング率が $70 \times 1000 \text{GPa}$ で厚さが 40mm の弾性体の板を与える．

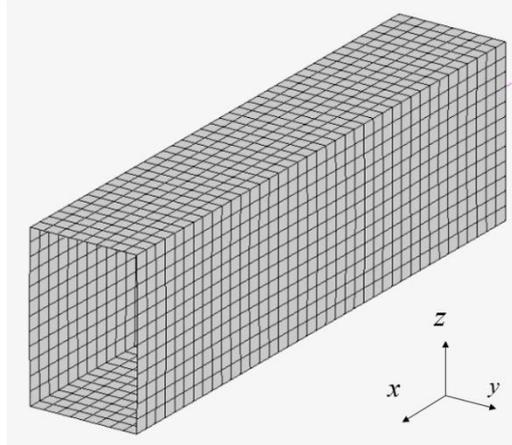


図 3.5 要素分割

3.5 箱型断面の形状

解析対象の箱型断面の形状を図 3.6 に示し、図中の記号の意味を次に示す.

B : 箱型断面の幅

H : 箱型断面の高さ

b_w, t_w : それぞれ, ウェブの純幅と板厚

b_f, t_f : それぞれ, フランジの純幅と板厚

$B=250\text{mm}$ として, 比 H/B に対して 1.0 から 2.0 の形状を考慮する.

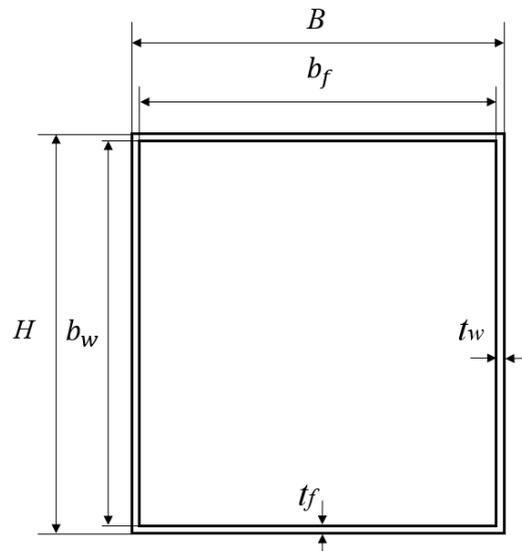


図 3.6 箱型断面の形状

圧縮を受ける両縁支持板の耐荷力が次式で与えられている⁵⁾.

$$\frac{\sigma_{lu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ 1 - 0.4 \left(\frac{R - R_1}{R_2 - R_1} \right) & (R_1 \leq R \leq R_2) \\ 0.6 \left(\frac{R_2}{R} \right)^m & (R_2 \leq R \leq 2) \end{cases} \quad (3.14)$$

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2) \sigma_{0.2} b}{4 E t}} \quad (3.15)$$

ここに、 σ_{lu} : 圧縮を受ける両縁支持板の耐荷力
 R : 幅厚比パラメータ
 μ : ポアソン比 (=0.3)
 $\sigma_{0.2}$: アルミニウム合金材の0.2%耐力
 E : ヤング率 (=70GPa)
 b : 板幅
 t : 板厚
 R_1, R_2, m : 表 3.3 に示す定数

表 3.3 R_1, R_2, m の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	R_1	R_2	m
A6061-T6	245	0.52	1.26	0.67
A5083-O	125	0.44	1.05	0.64

圧縮を受けるウェブとフランジの局部座屈に対する耐荷力が、圧縮を受ける両縁支持板の耐荷力で与えられると仮定し、式(3.14)より、 $\sigma_{lu}/\sigma_{0.2}$ の所定の値に対してウェブおよびフランジの幅厚比 b/t を算出し、得られた b/t の値に対して箱型断面の寸法を決める。このようにして決められた箱型断面の寸法を表 3.4 に示す。同表の $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2}$ と $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2}$ は、それぞれ、ウェブとフランジの $\sigma_{lu}/\sigma_{0.2}$ を表す。

表 3.4 箱型断面の寸法

識別 番号	アルミニウム 合金	$\frac{H}{B}$	$\frac{\sigma_{wlu}}{\sigma_{0.2}}$	$\frac{\sigma_{flu}}{\sigma_{0.2}}$	b_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)
1	A6061-T6	1.0	0.90	0.90	229.7	10.1	229.7	10.1
2			0.80	0.80	233.7	8.2	233.7	8.2
3			0.80	1.00	221.9	7.8	234.5	14.0
4			0.70	0.70	236.3	6.8	236.3	6.8
5		1.5	0.80	0.80	359.3	12.6	224.9	7.9
6			0.80	0.97	350.5	12.3	225.5	12.3
7		2.0	0.80	1.00	467.3	16.3	217.3	16.3
8			0.80	0.80	484.9	17.0	216.1	7.6
9			0.80	0.70	487.5	17.0	215.9	6.2
10		1.1	0.80	0.85	257.0	9.0	232.0	9.0
11		1.2	0.80	0.89	280.4	9.8	230.4	9.8
12		1.3	0.80	0.92	303.8	10.6	228.8	10.6
13		1.4	0.80	0.95	327.1	11.4	227.1	11.4
14		1.7	0.80	1.00	397.2	13.9	222.2	13.9
15	A5083-O	1.0	0.90	0.90	232.6	8.7	232.6	8.7
16		1.5	0.80	0.97	353.9	10.6	228.9	10.6
17		2.0	0.80	0.70	489.1	14.6	220.8	5.5

注記：B=250mm

3.6 Qの値

アルミニウム合金部材の全体座屈に対する耐荷力 σ_{gu} が次式で与えられている⁵⁾。

$$\frac{\sigma_{gu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda < \lambda_1) \\ a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2 + a_3\lambda^3 + a_4\lambda^4 & (\lambda_1 \leq \lambda \leq 2) \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{r} \quad (3.17)$$

- ここに、 λ : 圧縮を受ける部材の細長比パラメータ
 l : 圧縮を受ける部材の有効座屈長
 r : 圧縮を受ける部材の断面の回転半径
 $a_0 \sim a_4, \lambda_1$: 表 3.5 に示す定数

表 3.5 $a_0 \sim a_4$ と λ_1 の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	λ_1
A6061-T6	245	1.01	-0.03	-0.30	-0.04	0.05	0.13
A5083-O	125	1.00	0.10	-1.13	0.72	-0.14	0.09

表 3.4 の識別番号 1, 2, 4 の断面寸法 (A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2}$) に対する, 部材長 l が b_w と $3b_w$ に対する Q の値を表 3.6 に示す. 部材の両端が単純支持されているので, 部材長と有効座屈長とは同じである. 同表には λ の値も記してある. 短柱の圧縮耐荷力の解析では, 部材全体の初期たわみをゼロとし, ウェブとフランジの面外方向の初期たわみだけを考慮する. 有限要素法解析において, x 軸方向に強制変位を与える点に生じる反力が増加しなくなったときの値を箱型断面の全断面積で除し, さらに 0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ で除して得られる値が Q の値である.

短柱では全体座屈が生じないので, その長さは, λ が λ_1 より小さくなるような長さでなければならない. 表 3.6 に示すように, $l = b_w$ の λ の値は A6061-T6 に対する $\lambda_1 = 0.13$ より小さく, $l = 3b_w$ の λ の値は $\lambda_1 = 0.13$ を少し超える. 識別番号 1, 2, 4 の各断面寸法に対して, $l = b_w$ の Q の値が $l = 3b_w$ の Q の値より大きい. これは, 部材端に設けられた剛板によってウェブとフランジの面外変形が拘束されるからである. 本節では Q の値を求めるときの短柱の長さを $l = 3b_w$ とする. この長さの妥当性については, 本節の最後の注記で述べる.

表 3.6 l が b_w と $3b_w$ に対する Q の値

識別番号	$l = b_w$		$l = 3b_w$	
	λ	Q	Λ	Q
1	0.044	0.956	0.132	0.906
2	0.045	0.884	0.134	0.801
4	0.045	0.802	0.134	0.703

$l = 3b_w$ の短柱に対する Q の値を表 3.7 に示す. 同表には, λ の値, および λ の値を式(3.16)に代入することによって得られる全体座屈に対する耐荷力 $\sigma_{gu}/\sigma_{0.2}$ の値も示してある. λ の値は λ_1 の値を超すが, $\sigma_{gu}/\sigma_{0.2}$ の値はほぼ 1 である. したがって, 部材の全体変形の影響が Q の値に及ぼす影響は小さいと言える. y 軸 (強軸) 回りの λ の値が z 軸 (弱軸) 回りの λ の値より小さいので, 短柱の Q の値として, y 軸 (強軸) 回りの値を採用する.

表 3.7 Qの値

識別 番号	y 軸（強軸）回り				z 軸（弱軸）回り			
	l (mm)	λ	$\frac{\sigma_{gu}}{\sigma_{0.2}}$	Q	l (mm)	λ	$\frac{\sigma_{gu}}{\sigma_{0.2}}$	Q
1	689.168	0.132	1.000	0.906	/	/	/	/
2	700.987	0.134	1.000	0.801	/	/	/	/
3	665.817	0.121	1.000	0.931	665.817	0.137	1.000	0.931
4	708.960	0.134	1.000	0.703	/	/	/	/
5	1077.829	0.152	0.998	0.831	1077.829	0.190	0.993	0.828
6	1051.480	0.141	1.000	0.900	1051.480	0.194	0.993	0.895
7	1401.973	0.147	0.999	0.903	1401.973	0.255	0.982	0.893
8	1454.671	0.166	0.997	0.834	1454.671	0.250	0.983	0.823
9	1462.504	0.170	0.996	0.823	1462.504	0.249	0.984	0.815
10	771.085	0.135	1.000	0.828	771.085	0.146	0.999	0.827
11	841.184	0.137	1.000	0.856	841.184	0.158	0.998	0.853
12	911.283	0.138	1.000	0.872	911.283	0.170	0.996	0.872
13	981.381	0.140	1.000	0.883	981.381	0.182	0.994	0.881
14	1191.677	0.144	0.999	0.897	1191.677	0.218	0.989	0.896
15	697.661	0.095	1.000	0.911	/	/	/	/
16	1061.657	0.101	0.999	0.900	1061.657	0.139	0.994	0.895
17	1467.191	0.121	0.997	0.826	1467.191	0.177	0.986	0.823

箱型断面の短柱の Q の値が次式で推定できると仮定する。

$$Q = \frac{\frac{\sigma_{wlu}}{\sigma_{0.2}} A_w + \frac{\sigma_{flu}}{\sigma_{0.2}} A_f}{A_w + A_f} \quad (3.18)$$

ここに、 σ_{wlu} , σ_{flu} : それぞれ、式(3.14)で与えられるウェブとフランジの圧縮耐荷力

A_w , A_f : それぞれ、ウェブとフランジの各1枚の断面積

式(3.18)で推定される Q の値と解析値の比較を表 3.8 に示す。 $H/B = 1.0$ の場合、推定値は解析値にほぼ等しい。 H/B が大きくなるに従って、推定値は解析値より小さくなり、識別番号 9 の場合、解析値に対して推定値は 4.5% 程小さくなる。したがって、式(3.18)で与えられる Q の値は、箱型断面の形状が正方形の場合には良い推定値を与え、断面形状が細長くなるに従って実際より低めの推定値を与える。

表 3.8 Qの推定値と解析値の比較

識別 番号	アルミニウム 合金	$\frac{H}{B}$	$\frac{\sigma_{wtu}}{\sigma_{0.2}}$	$\frac{\sigma_{flu}}{\sigma_{0.2}}$	Q		推定値 解析値
					推定値	解析値	
1	A6061-T6	1.0	0.90	0.90	0.90	0.906	0.994
2			0.80	0.80	0.80	0.801	0.999
3			0.80	1.00	0.931	0.931	1.000
4			0.70	0.70	0.70	0.703	0.995
5		1.5	0.80	0.80	0.80	0.831	0.962
6			0.80	0.97	0.867	0.900	0.963
7		2.0	0.80	1.00	0.863	0.903	0.957
8			0.80	0.80	0.80	0.834	0.960
9			0.80	0.70	0.786	0.823	0.955
10		1.1	0.80	0.85	0.822	0.828	0.993
11		1.2	0.80	0.89	0.839	0.856	0.979
12		1.3	0.80	0.92	0.851	0.872	0.975
13		1.4	0.80	0.95	0.860	0.883	0.974
14		1.7	0.80	1.00	0.872	0.897	0.972
15	A5083-O	1.0	0.90	0.90	0.90	0.911	0.988
16		1.5	0.80	0.97	0.868	0.900	0.965
17		2.0	0.80	0.70	0.786	0.826	0.951

式(3.18)より次の関係が成立する.

$$Q \geq \min\left(\frac{\sigma_{wtu}}{\sigma_{0.2}}, \frac{\sigma_{flu}}{\sigma_{0.2}}\right) \quad (3.19)$$

前章で述べたように、道路橋示方書¹⁰⁾では、圧縮を受ける部材の全体と局所の連成耐荷力に対して積公式が採用され、Qに対して、部材を構成する板要素の局部座屈に対する耐荷力が用いられる。そして、実際の設計においては、部材を構成する板要素の中で最小の耐荷力を与える板要素の値が用いられる。次節以下で述べるように、式(2.2)が与える Q ファクター法による圧縮部材の連成耐荷力は、解析値を安全側に評価する。前章で述べたように、積公式による圧縮部材の連成耐荷力は Q ファクター法のそれよりさらに低い。したがって、道路橋示方書の積公式によって与えられる値は、圧縮部材の連成耐荷力を過度に安全側に評価していると言える。

注記

4.5節のI型断面部材の短柱の解析において、 $l = 3b_w$ の部材長では、部材端に設けられた剛板による拘束の影響が大きく表れ、 Q の値を大きく算出することが示される。したがって、次章以降の解析では、圧縮部材に全体座屈を生じさせない境界条件を課し、さらに全体座屈に関する初期たわみを与えず、ウェブとフランジの面外方向の初期たわみだけを導入した解析が行われる。

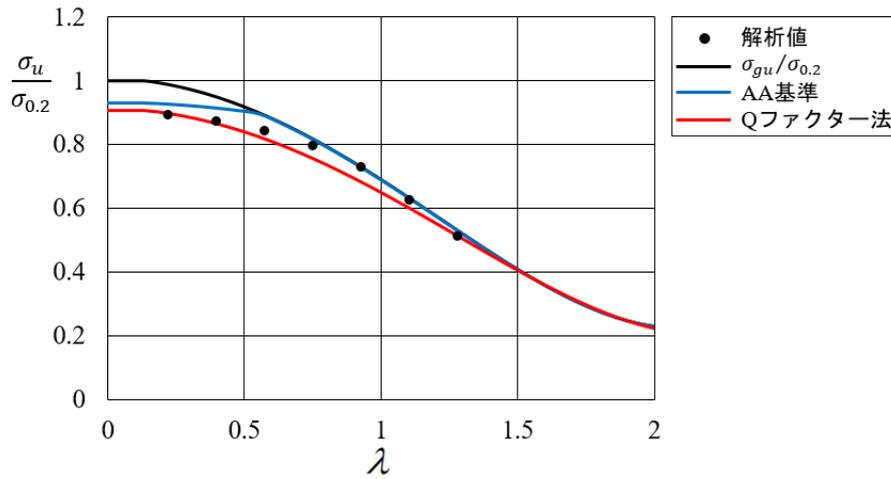
表3.4の識別番号2の断面寸法（A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$ ）の箱型断面部材に対して、全体座屈を生じさせない境界条件を表3.9に示す。図3.2を参照して、点Iの v と w および θ_x , θ_y , θ_z を固定する。辺AB, CD, BD, ACに対称性の境界条件を設け、さらに、点EとFの w を固定し、点GとHの v を固定する。部材長は $l = 25b_w$ である。これに対する Q の値は0.791である。この値は、本節の解析で得られた Q の値0.801に近い。したがって、本章の箱型断面部材に対しては、部材長を $l = 3b_w$ として、表3.2の境界条件に対する解析で良いと言える。

表 3.9 全体座屈を生じさせない境界条件

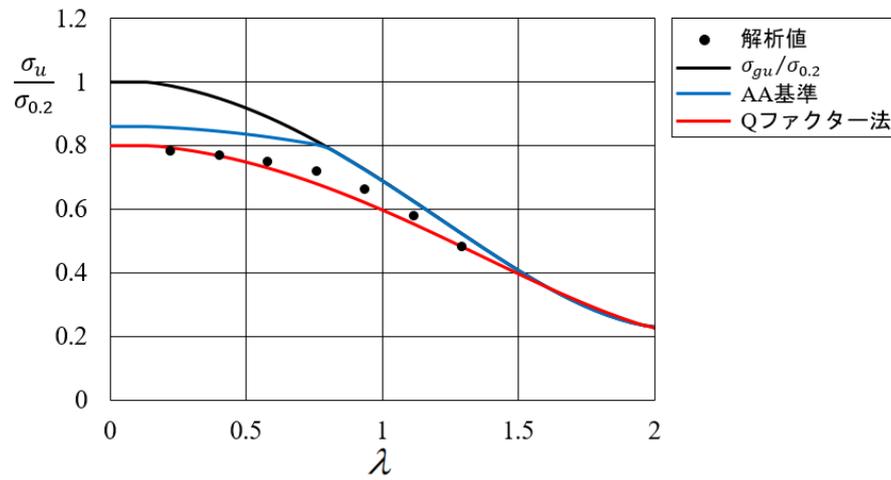
	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
点 I	強制変位	固定	固定	固定	固定	固定
辺 AC, CD, BD, AB	固定	-	-	-	固定	固定
点 E, F	-	-	固定	-	-	-
点 G, H	-	固定	-	-	-	-

3.7 連成耐荷力の評価

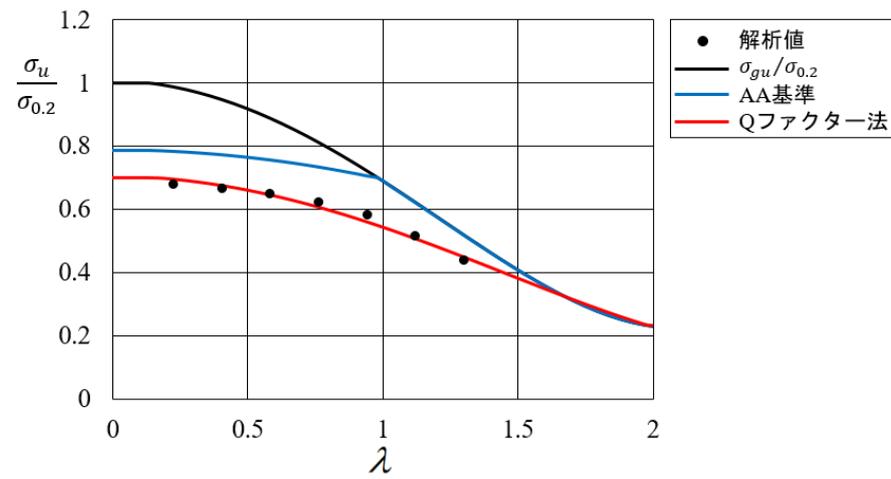
表3.4の識別番号1, 2, 4の断面寸法（A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2}$ ）に対する $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係および解析値を図3.7に示す。全体座屈に対する耐荷力 $\sigma_{gu}/\sigma_{0.2}$ は式(3.16)で与えられ、AA基準とQファクター法による連成耐荷力は、それぞれ式(2.1), (2.2)で与えられる。式(2.1)の $\sigma_{tu}/\sigma_{0.2}$ には表3.4の $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2}$ と $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2}$ のどちらか小さい方の値を用いる。式(2.2)の Q の値には表3.7の y 軸（強軸）回りの解析値を用いる。図3.7から分かるように、AA基準の曲線は解析値よりかなり高い位置にある。Qファクター法の曲線は解析値の少し下を通過する。



(a) $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.9$



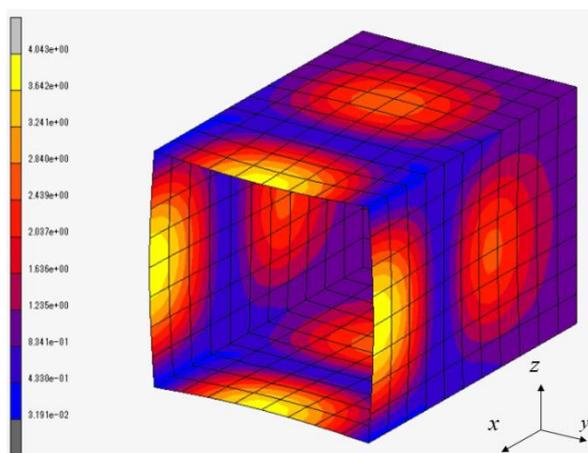
(b) $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$



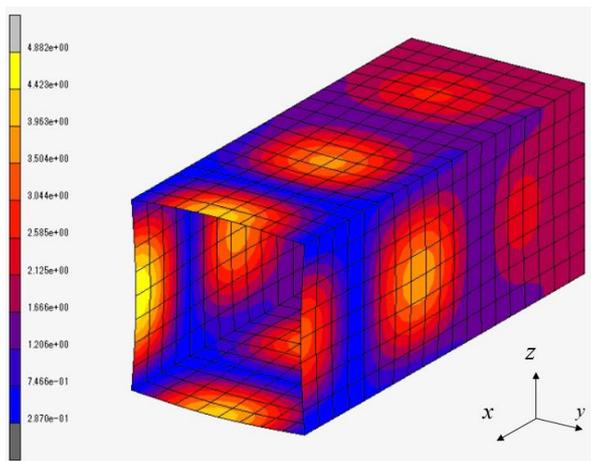
(c) $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.7$

図 3.7 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係 (A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2}$)

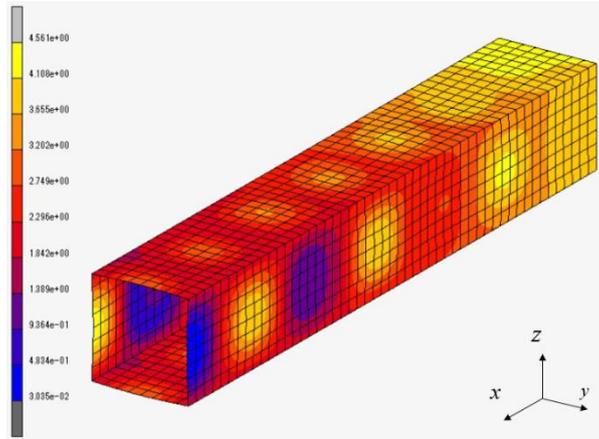
表 3.4 の識別番号 2 の断面寸法 (A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$) に対する終局時の変形を図 3.8 に示す. 図 3.8(a) は, 前節で述べた短注部材の終局時の変形である. この場合, ウェブとフランジが面外方向に変形している. 図 3.8(b) に示すように, λ が小さい場合には, 部材の変形は短柱部材の変形に類似する. 図 3.8(d) に示すように, λ が大きくなると, ウェブとフランジに面外変形が発生せず, 部材は z 軸回りに全体変形する. 図 3.8(c) に示すように, $\lambda = 0.579$ の場合には, ウェブとフランジに面外変形が生じるとともに, 部材は z 軸回りにも全体変形する.



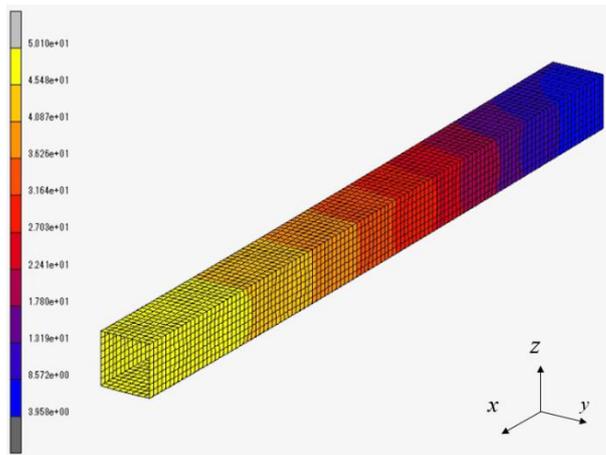
(a) $\lambda = 0.134$ ($l = 3b_w$)



(b) $\lambda = 0.223$ ($l = 5b_w$)



(c) $\lambda = 0.579$ ($l = 13b_w$)



(d) $\lambda = 1.292$ ($l = 29b_w$)

図 3.8 終局時の変形 (A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

表 3.4 の識別番号 3 の断面寸法 (A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 1.0$) に対する $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係を図 3.9 に示す. Q ファクター法の曲線は解析値の下近くを通過するが, AA 基準の曲線は解析値よりかなり下を通過する.

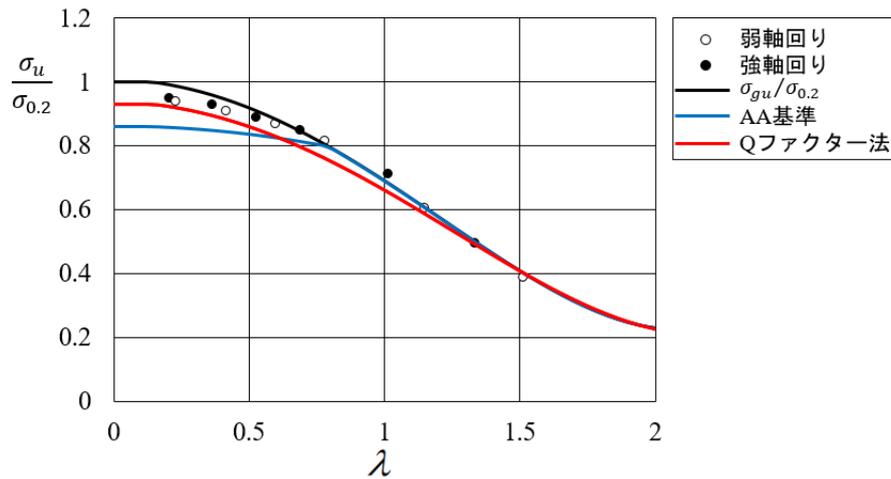
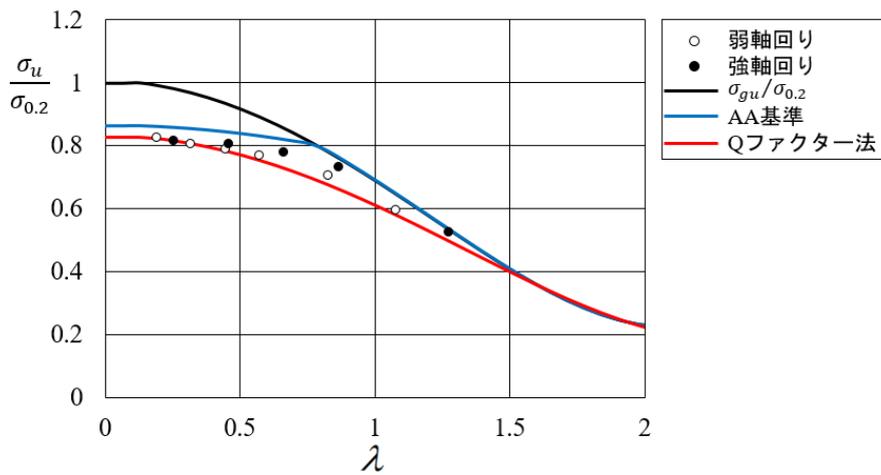
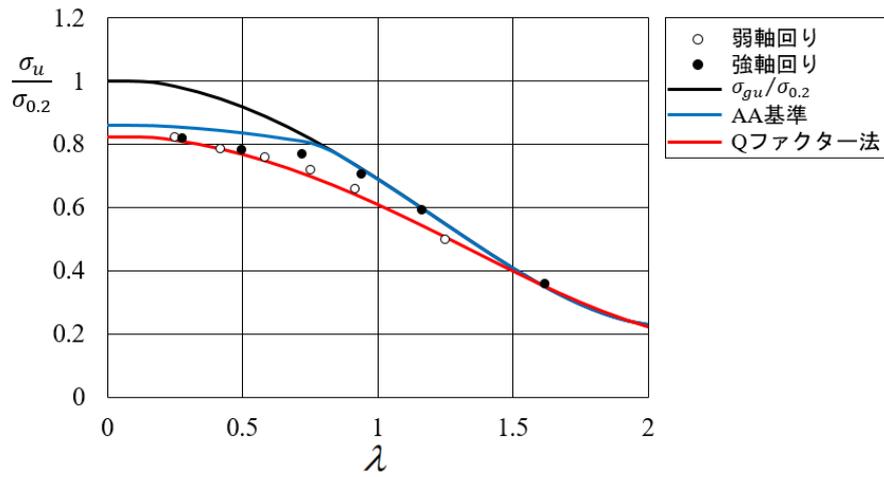


図 3.9 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係 (A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 1.0$)

表 3.4 の識別番号 5 と 8 の断面寸法 (A6061-T6, $H/B = 1.5$ と 2.0 , $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$) に対する $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係を 図 3.10 に示す. AA 基準の曲線は解析値より高い位置にあるが, Q ファクター法の曲線は解析値の下を通過する.



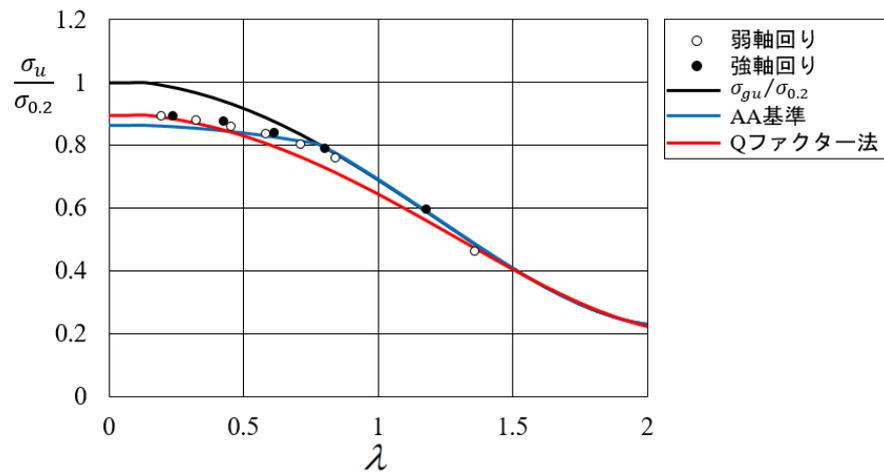
(a) $H/B = 1.5$



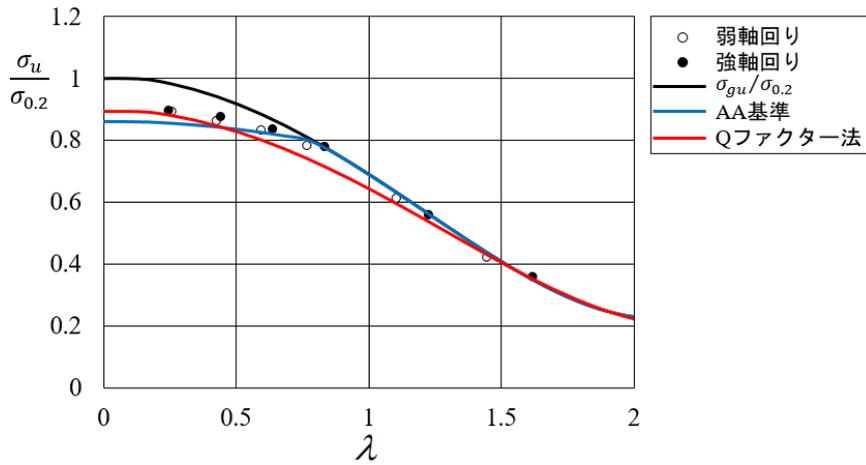
(b) $H/B = 2.0$

図 3.10 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係 (A6061-T6, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

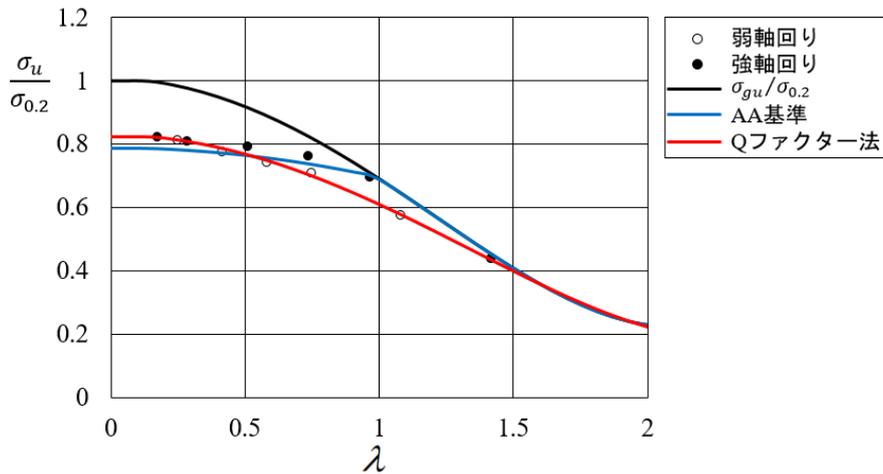
AA 基準の曲線が解析値の近くを通過する例として、表 3.4 の識別番号 6, 7, 9 の断面寸法 (A6061-T6) に対する $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係を図 3.11 に示す。AA 基準および Q ファクター法の曲線ともに解析値の近くを通過する。



(a) $H/B = 1.5$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.97$



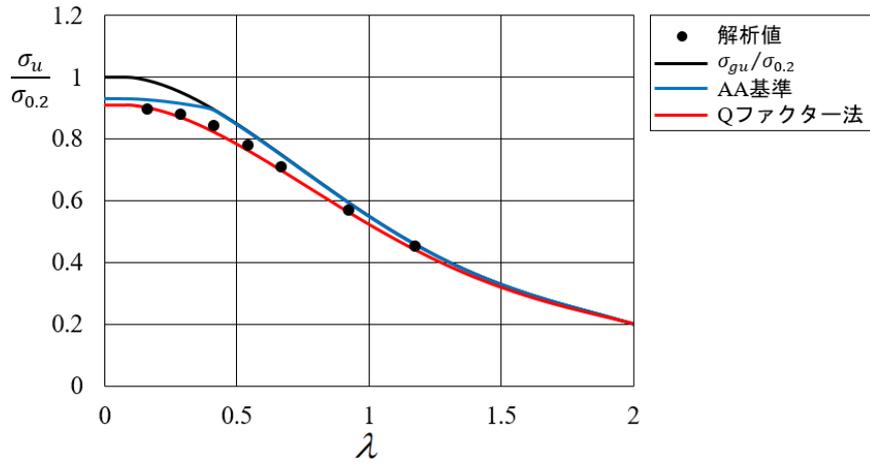
(b) $H/B = 2.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 1.0$



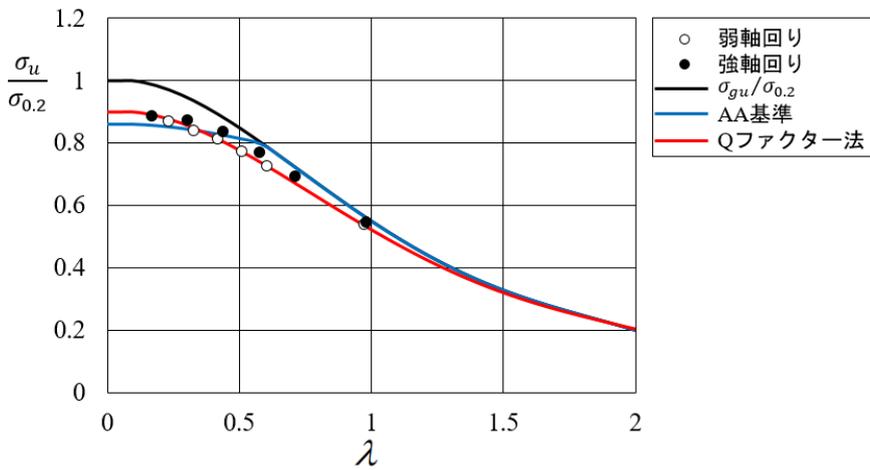
(c) $H/B = 2.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.7$

図 3.11 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係 (A6061-T6)

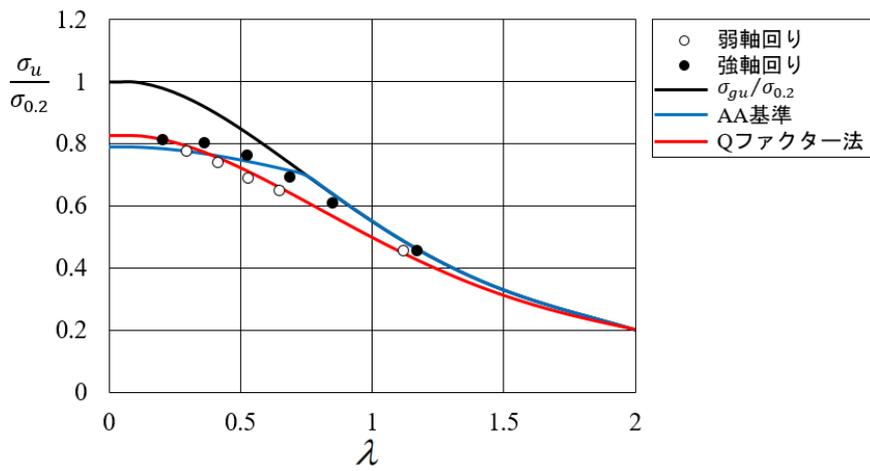
表 3.4 の識別番号 15, 16, 17 の断面寸法 (A5083-O) に対する $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係を図 3.12 に示す。A5083-O の箱型断面材の解析値に対しても Q ファクター法による評価が AA 基準の評価より優れていると言える。



(a) $H/B = 1.0$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.9$



(b) $H/B = 1.5$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.97$



(c) $H/B = 2.0$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.7$

図 3.12 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係 (A5083-O)

以上より、解析された全ての場合に対して、Qファクター法によって推定される連成耐荷力は、解析値の下近傍を通過するが、AA基準によって推定される箱型断面部材の連成耐荷力は、解析値に近い場合もあるが、解析値を大きく上回る場合あるいは下回る場合がある。したがって、箱型断面部材に対してQファクター法による連成耐荷力評価がAA基準のそれより優れていると言える。

第4章 圧縮を受ける I 型断面部材の連成耐荷力

4.1 解析対象と境界条件

圧縮を受ける I 型断面部材の耐荷力を、有限要素法による弾塑性有限変位解析を用いて算出する。図 4.1 に示すように、部材の中央に対称性の境界条件を設けることによって部材の右側半分を解析対象とする。右端に剛板を設け、剛板の中心点 G を x 軸方向に強制変位させることによって、部材に圧縮荷重を与える。部材が z 軸回りと y 軸回りに座屈する場合に対する境界条件を、それぞれ表 4.1(a), (b) に示す。点 G の v と w を固定し、さらに、点 G に対して、 z 軸回りに座屈する場合には θ_x と θ_y を固定し、 y 軸回りに座屈する場合には θ_x と θ_z を固定する。辺 AC, BE, DF に対称性の境界条件を設ける。さらに、 z 軸回りに座屈する場合には点 B と E の w を固定し、 y 軸回りに座屈する場合には両点の v を固定する。

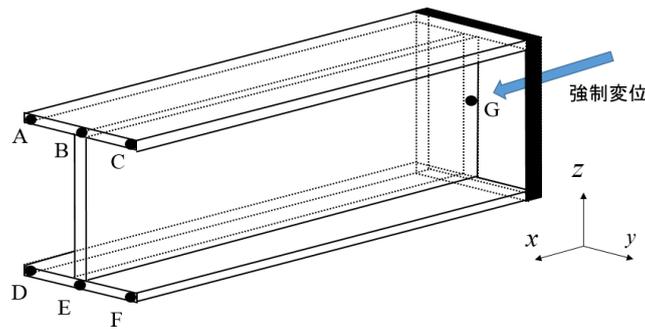


図 4.1 解析モデル

表 4.1 境界条件

(a) z 軸回り

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
点 G	強制変位	固定	固定	固定	固定	-
辺 AC, BE, DF	固定	-	-	-	固定	固定
点 B, E	-	-	固定	-	-	-

(b) y 軸回り

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
点 G	強制変位	固定	固定	固定	-	固定
辺 AC, BE, DF	固定	-	-	-	固定	固定
点 B, E	-	固定	-	-	-	-

4.2 初期たわみ

I型断面部材の初期たわみは，ウェブの面外方向の初期たわみを与える式(3.12)に対して+のみを考慮し，フランジの面外方向の初期たわみを与える式(3.13)を次式に変更することにより，式(3.2)～(3.13)で与えられる．

$$w_{0l} = \pm \frac{b_f}{100} \frac{y - b_f}{b_f} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (4.1)$$

式(4.1)の $b_f/100$ は，アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）⁵⁾で規定される，フランジの直角度に対して許容される最大の初期たわみである．フランジは圧縮を受ける自由突出板であるので， x 軸方向の面外方向の初期たわみ形状に対して，部材長 l を半波長とする正弦波とする．**図 4.2** を参照して，式(4.1)の右辺の \pm は，上フランジに対して+，下フランジに対して-である．

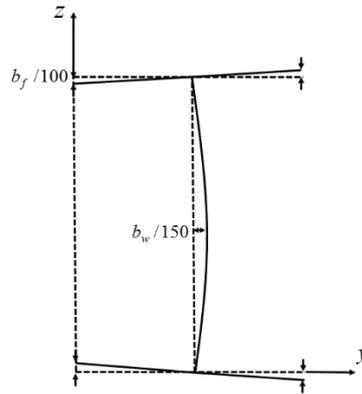


図 4.2 I型断面部材のウェブとフランジの面外方向の初期たわみ形状

4.3 要素分割

圧縮を受ける自由突出板の耐荷力は板幅方向を 8 等分割すれば十分な精度の解が得られることが明らかにされている¹⁷⁾。さらに、圧縮を受ける I 型断面部材の全体座屈に対する耐荷力はウェブとフランジの板幅方向をともに 8 等分割すれば十分な精度の解が得られることが明らかにされている¹⁶⁾。したがって、図 4.3 に示すように、フランジの板幅方向を 16 等分割し、ウェブの板幅方向の要素分割は、3.4 節の箱型断面部材のウェブの要素分割と同じとする。

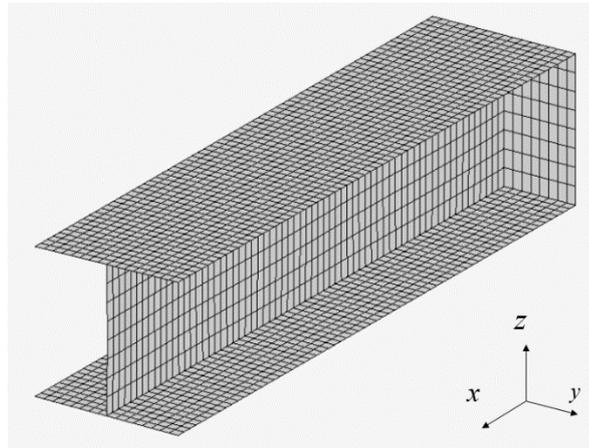


図 4.3 要素分割

4.4 I 型断面の形状

解析対象の I 型断面の形状を図 4.4 に示す。 $B=250\text{mm}$ として、比 H/B に対して 1.0 と 2.0 の形状を考慮する。

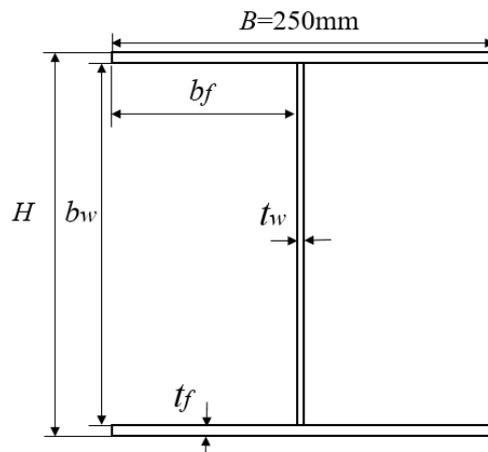


図 4.4 I 型断面の形状

圧縮を受ける自由突出板の耐荷力は次式で与えられる⁵⁾.

$$\frac{\sigma_{lu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ 1 - 0.35 \left(\frac{R - R_1}{R_2 - R_1} \right)^2 & (R_1 \leq R \leq R_2) \\ 0.65 \left(\frac{R_2}{R} \right)^m & (R_2 \leq R \leq 2) \end{cases} \quad (4.2)$$

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2) \sigma_{0.2} b}{0.425 E t}} \quad (4.3)$$

ここに, R_1, R_2, m : 表 4.2 に示す定数

表 4.2 R_1, R_2, m の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	R_1	R_2	m
A6061-T6	245	0.60	1.24	0.16
A5083-O	125	0.40	1.02	0.20

圧縮を受けるウェブとフランジの局部座屈に対する耐荷力が, それぞれ, 両縁支持板の圧縮耐荷力, 自由突出板の圧縮耐荷力で与えられると仮定すると, ウェブの局部座屈に対する耐荷力は式(3.14)で与えられ, フランジのそれは式(4.2)で与えられる. 3.5 節の箱型断面の寸法の決め方と同様な方法で決められた I 型断面の寸法を表 4.3 に示す. 同表のウェブに対する $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2}$ は式(3.14)で与えられる $\sigma_{lu}/\sigma_{0.2}$ を表し, フランジに対する $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2}$ は式(4.2)で与えられる $\sigma_{lu}/\sigma_{0.2}$ を表す.

表 4.3 I 型断面の寸法

識別番号	アルミニウム合金	$\frac{H}{B}$	$\frac{\sigma_{wlu}}{\sigma_{0.2}}$	$\frac{\sigma_{flu}}{\sigma_{0.2}}$	b_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)
18	A6061-T6	1.0	0.80	1.00	211.4	7.4	121.3	19.3
19			0.80	0.80	228.7	8.0	121.0	10.7
20			1.00	0.80	229.2	13.7	118.1	10.4
21		2.0	0.80	1.00	462.8	16.2	116.9	18.6
22			0.80	0.80	479.5	16.8	116.7	10.3
23			1.00	0.80	480.5	28.8	110.6	9.7
24	A5083-O	1.0	0.80	0.80	230.9	6.9	121.6	9.5
25		2.0	0.80	0.80	481.5	14.4	117.8	9.2

4.5 Qの値

表 4.3 の識別番号 20 の断面寸法 (A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 1.0$, $\sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$) に対して, その長さが $l = 3b_w$ ($\lambda = 0.126$) の短柱の y 軸 (強軸) 回りに対する圧縮耐荷力を, 3.6 節と同様にして求めると, $Q = 1.007$ を得る. Q の値が 1.0 に近いのは, I 型断面部材の場合, 部材端に設けられた剛板によるフランジおよびウェブの面外変形に対する拘束が大きいからである. 部材端の剛板の影響を小さくするためには部材長を長くする必要があるが, 部材長を長くすると全体座屈が生じる. したがって, 表 4.4 に示すように, 全体座屈を生じさせない境界条件を部材に設ける. 図 4.1 を参照して, 点 G の v と w および θ_x , θ_y , θ_z を固定する. 辺 AC, BE, DF に対称性の境界条件を与え, さらに, 点 B と E の v と w を固定する. この様な境界条件に対して, 全体座屈に対する初期たわみをゼロとし, ウェブとフランジの面外方向の初期たわみだけを考慮して得られる Q の値を表 4.5 に示す. 同表の λ の値は y 軸 (強軸) 回りに対する値である. l が $9b_w$ から $33b_w$ になるに従って, Q の値は 0.955 から 0.941 に低下するが, この間で Q の値の低下が小さいので, $l = 9b_w$ を解析対象の部材長とする. 部材長 $l = 9b_w$ に対する終局時の変形を図 4.5 に示す. 部材全体の変形は発生せず, ウェブとフランジに面外座屈が生じている.

表 4.4 全体座屈を生じさせない境界条件

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
点 G	強制変位	固定	固定	固定	固定	固定
辺 AC, BE, DF	固定	-	-	-	固定	固定
点 B, E	-	固定	固定	-	-	-

表 4.5 I 型断面部材の部材長と Q の値

$l(\text{mm})$	λ [y 軸 (強軸) 回り]	Q
$9b_w$	0.377	0.955
$21b_w$	0.880	0.955
$25b_w$	1.048	0.954
$29b_w$	1.216	0.945
$33b_w$	1.383	0.941

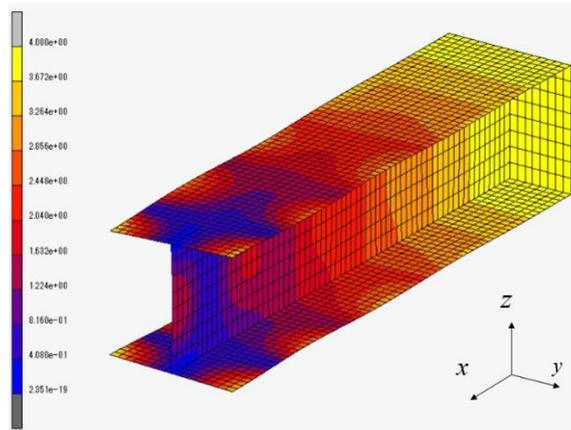


図 4.5 終局時の変形

(A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = 1.0$, $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $l = 9b_w$)

表 4.3 の識別番号 18~25 の I 型断面部材の Q の値を表 4.6 に示す.

表 4.6 Q の値

識別番号	$l(\text{mm})$	λ [y 軸 (強軸) 回り]	Q
18	1902.624	0.327	0.995
19	2058.168	0.357	0.891
20	2062.701	0.377	0.955
21	4165.208	0.392	0.922
22	4315.117	0.434	0.815
23	4324.622	0.471	0.951
24	2078.263	0.256	0.928
25	4333.544	0.308	0.825

I 型断面の短柱の Q の値が次式で推定できると仮定する.

$$Q = \frac{\frac{\sigma_{wlu}}{\sigma_{0.2}} A_w + 2 \frac{\sigma_{flu}}{\sigma_{0.2}} A_f}{A_w + 2A_f} \quad (4.4)$$

ここに, σ_{wlu} : 式(3.14)で推定されるウェブの局部座屈に対する耐荷力

σ_{flu} : 式(4.2)で推定されるフランジの局部座屈に対する耐荷力

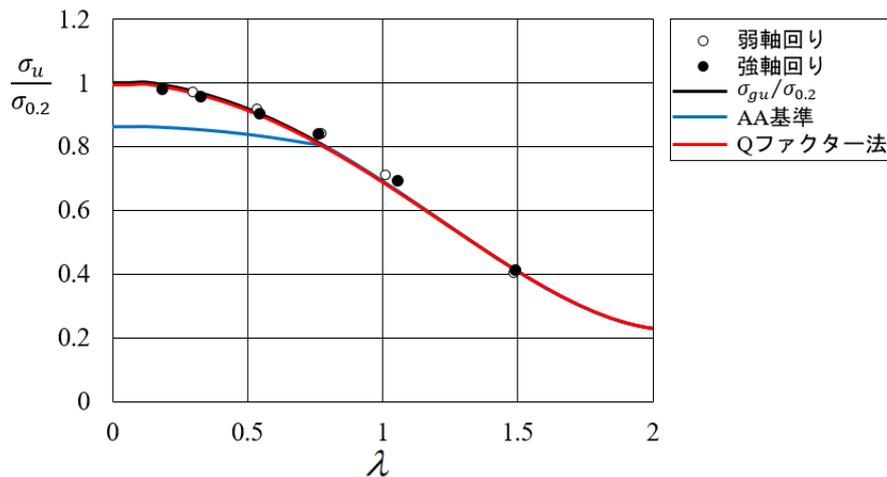
式(4.4)で推定される Q の値と解析値の比較を表 4.7 に示す. $H/B = 1.0$ の場合, A6061-T6 および A5083-O とともに, 推定値は解析値より低めの値となり, $H/B = 2.0$ の場合, 推定値は解析値に近い値となる.

表 4.7 Qの推定値と解析値の比較

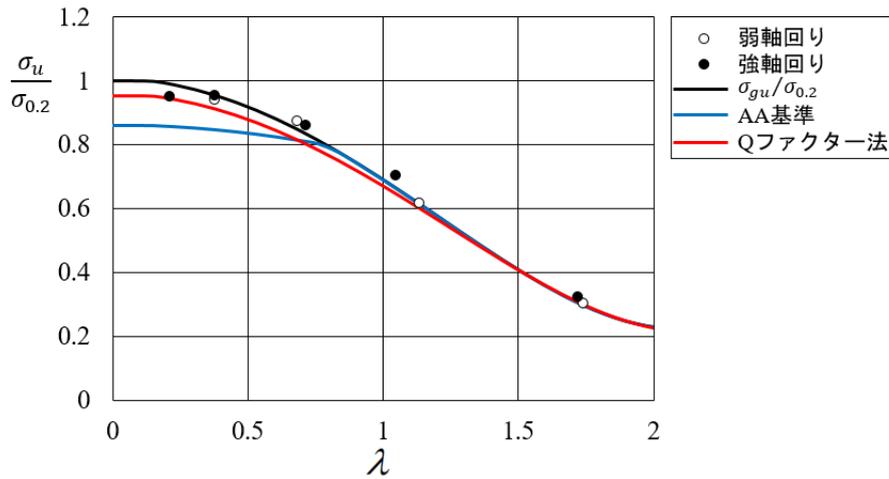
識別 番号	アルミニウム 合金	$\frac{H}{B}$	$\frac{\sigma_{wtu}}{\sigma_{0.2}}$	$\frac{\sigma_{flu}}{\sigma_{0.2}}$	Q		推定値 解析値		
					推定値	解析値			
18	A6061-T6	1.0	0.80	1.00	0.971	0.995	0.976		
19					0.80	0.80	0.80	0.891	0.898
20					1.00	0.80	0.878	0.955	0.916
21		2.0	0.80	1.00	0.907	0.922	0.988		
22					0.80	0.80	0.80	0.815	0.982
23					1.00	0.80	0.952	0.951	1.001
24	A5083-O	1.0	0.80	0.80	0.80	0.928	0.862		
25		2.0	0.80	0.80	0.80	0.825	0.970		

4.6 連成耐荷力の評価

表 4.3 の識別番号 18 と 20 の断面寸法 (A6061-T6, $H/B = 1.0$) に対する $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係を図 4.6 に示す. I 型断面部材の弱軸回り (z 軸回り) および強軸回り (y 軸回り) に対して解析が行われている. 全体座屈に対する耐荷力 $\sigma_{gu}/\sigma_{0.2}$ は式(3.16)で与えられ, AA 基準と Q ファクター法による連成耐荷力は, それぞれ式(2.1), (2.2)で与えられる. 式(2.1)の $\sigma_{lu}/\sigma_{0.2}$ には表 4.3 の $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2}$ と $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2}$ のどちらか小さい方の値を用いる. 式(2.2)の Q には表 4.6 の値を用いる. 図 4.6 から分かるように, AA 基準の曲線は解析値よりかなり低い位置にあり, Q ファクター法の曲線は解析値の少し下を通過する.



(a) $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 1.0$



(b) $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 1.0, \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$

図 4.6 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係 (A6061-T6, $H/B = 1.0$)

表 4.3 の識別番号 19 の断面寸法 (A6061-T6, $H/B = 1.0, \sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$) に対する $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係を図 4.7 に示す. AA 基準の曲線および Q ファクター法の曲線がともに解析値の下を通過する.

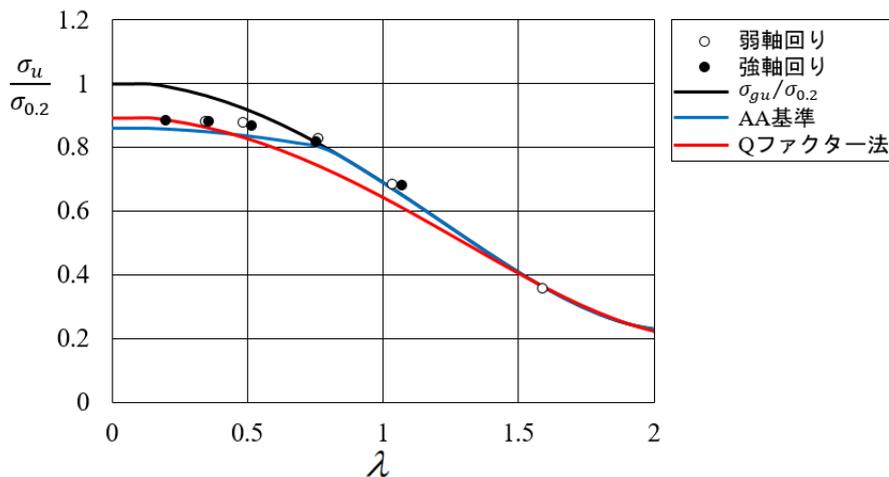
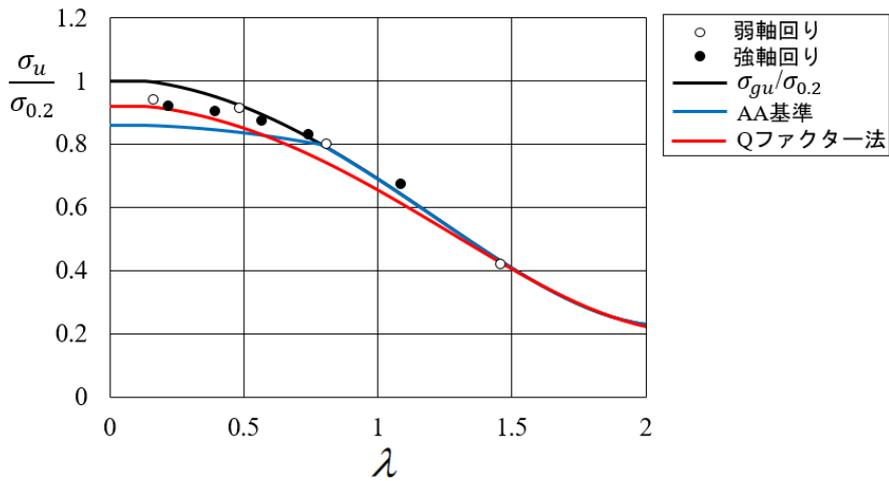
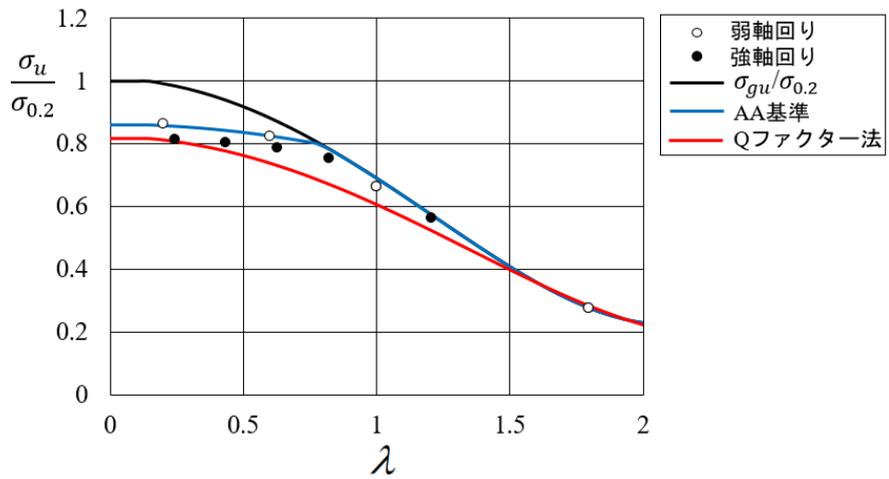


図 4.7 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係 (A6061-T6, $H/B = 1.0, \sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

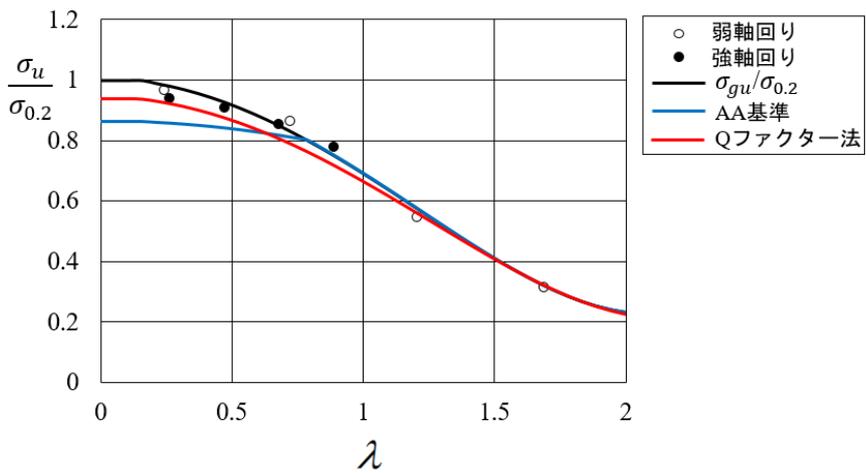
表 4.3 の識別番号 21, 22, 23 の断面寸法 (A6061-T6, $H/B = 2.0$) に対する $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係を図 4.8 に示す. 図 4.8(a)と(c)に示すように, 識別番号 21 と 23 の断面を持つ部材に対して, AA 基準の曲線は解析値を大きく下回り, 図 4.8(b)に示すように, 識別番号 22 の断面を持つ部材に対して, AA 基準の曲線は解析値を上回る. これに対して, Q ファクター法による曲線は解析値の直下を通過する.



(a) $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 0.8, \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 1.0$ (識別番号 21)



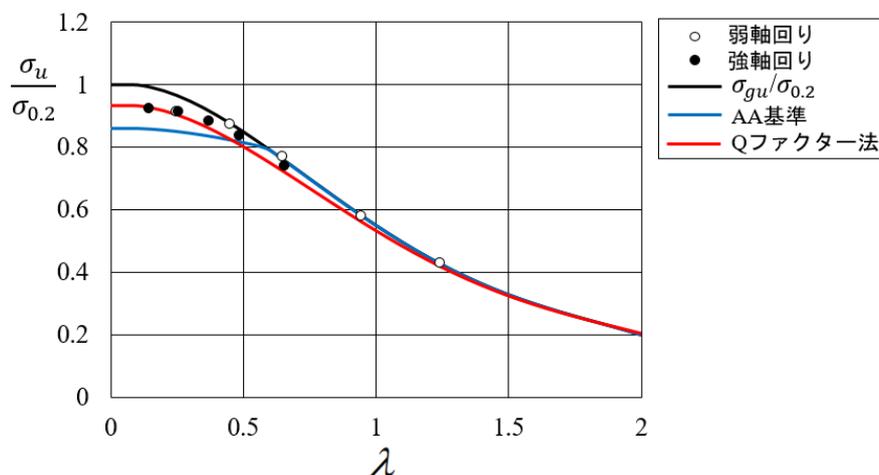
(b) $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$ (識別番号 22)



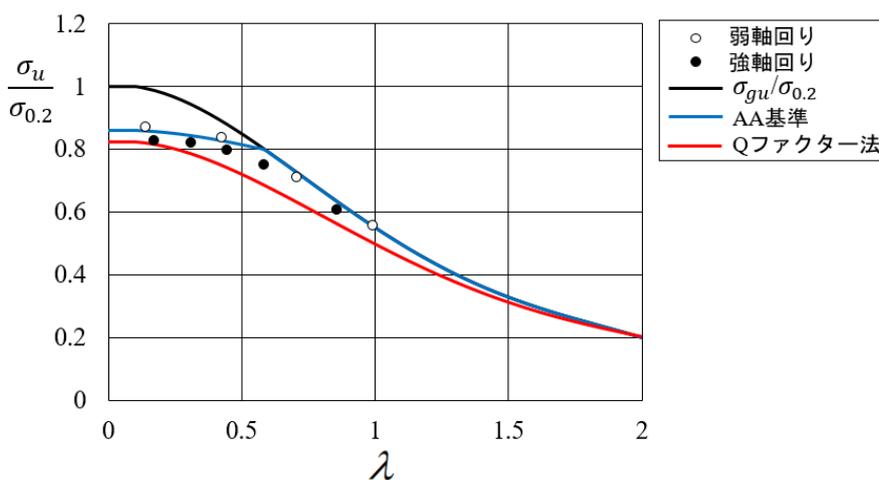
(c) $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 1.0, \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$ (識別番号 23)

図 4.8 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係 (A6061-T6, $H/B = 2.0$)

表 4.3 の識別番号 24 と 25 の断面寸法 (A5083-O) に対する $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係を図 4.9 に示す. A5083-O の I 型断面部材の解析結果に対しても Q ファクター法による評価が AA 基準の評価より優れていると言える.



(d) $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$



(e) $H/B = 2.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$

図 4.9 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係 (A5083-O)

以上より, 解析された全ての場合に対して, Q ファクター法によって推定される連成耐荷力は, 解析値の下近傍を通過するが, AA 基準によって推定される連成耐荷力は, 解析値を大きく上回る場合あるいは下回る場合がある. したがって, I 型断面部材に対しても Q ファクター法による連成耐荷力評価が AA 基準のそれより優れていると言える.

第5章 縦補剛された圧縮部材の連成耐荷力

5.1 縦補剛された圧縮部材の断面形状

1本の縦補剛材を有する、アルミニウム合金 A6061-T6 の押出型材の両縁支持板の圧縮耐荷力 σ_{lu} が次式で与えられている⁶⁾。

$$\frac{\sigma_{lu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (0.3 \leq R \leq 0.4) \\ 0.854 + 0.942R - 1.771R^2 + 0.877R^3 - 0.141R^4 & (0.4 \leq R \leq 2) \end{cases} \quad (5.1)$$

$$R = \frac{b}{64.3t} \quad (5.2)$$

式(5.1)の圧縮耐荷力 σ_{lu} を与える両縁支持板の断面形状は次式で与えられる。

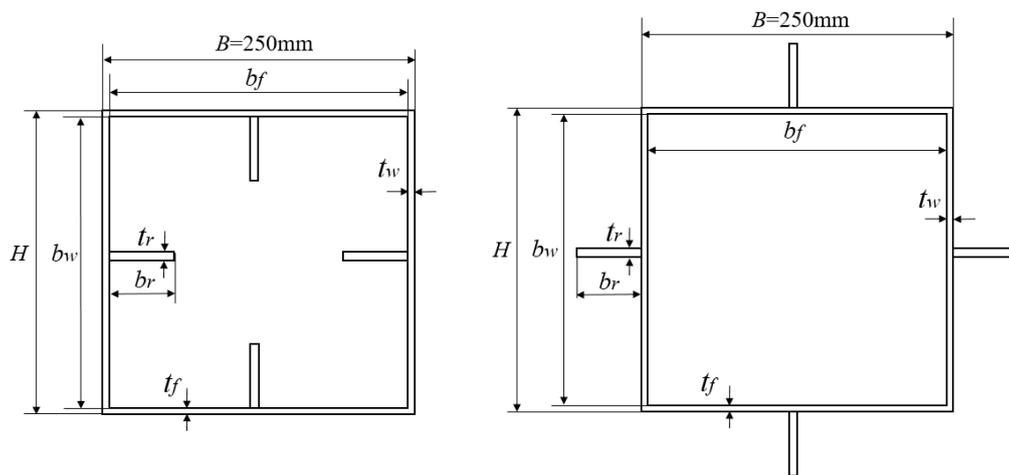
$$\frac{t_r}{t} = 2.77 \times 10^{-3} \frac{b}{t} + 1.18 \quad \left(19 \leq \frac{b}{t} \leq 129\right) \quad (5.3)$$

$$b_r = 6.28t_r \quad (5.4)$$

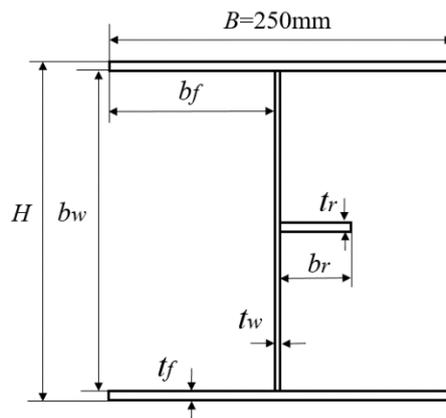
ここに、 b_r , t_r : それぞれ、縦補剛材の板幅と板厚

式(5.3)と(5.4)が与える断面形状は、一様な圧縮応力が作用する、1本の縦補剛材を有する長方形板の座屈強度を最大にするような形状である^{6),18)}。

縦補剛された箱型断面部材および I 型断面部材に対して、解析で考慮する断面形状を図 5.1 に示す。箱型断面部材のウェブとフランジおよび I 型断面部材のウェブの圧縮耐荷力が、縦補剛された両縁支持板の圧縮耐荷力で与えられると仮定して、それらの圧縮耐荷力が式(5.1)で与えられる。I 型断面部材のフランジの圧縮耐荷力が自由突出板の圧縮耐荷力で与えられると仮定して、フランジの圧縮耐荷力が式(4.2)で与えられる。3.5 節および 4.4 節と同様な方法で決められた、縦補剛された圧縮部材の断面寸法を表 5.1 に示す。同表において、識別番号 26 と 27 の $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2}$ と $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2}$ は式(5.1)で与えられる $\sigma_{lu}/\sigma_{0.2}$ を表し、識別番号 28 と 29 の $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2}$ は式(5.1)で与えられる $\sigma_{lu}/\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2}$ は式(4.2)で与えられる $\sigma_{lu}/\sigma_{0.2}$ を表す。



(a) 箱型断面



(b) I型断面

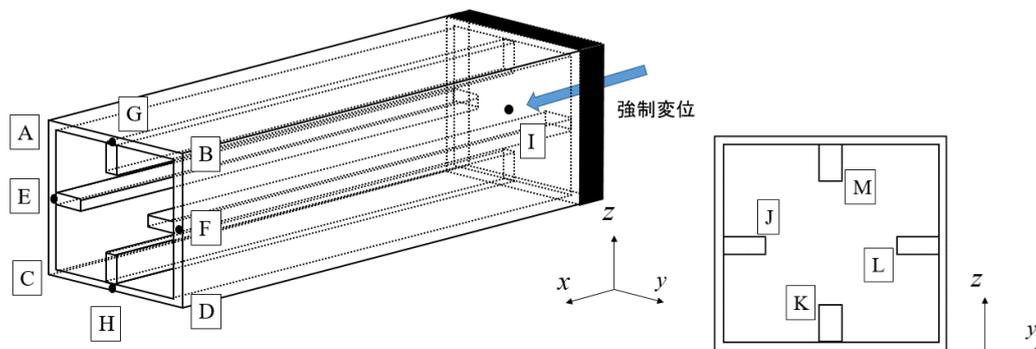
図 5.1 縦補剛された圧縮部材の断面形状

表 5.1 縦補剛された圧縮部材の断面寸法

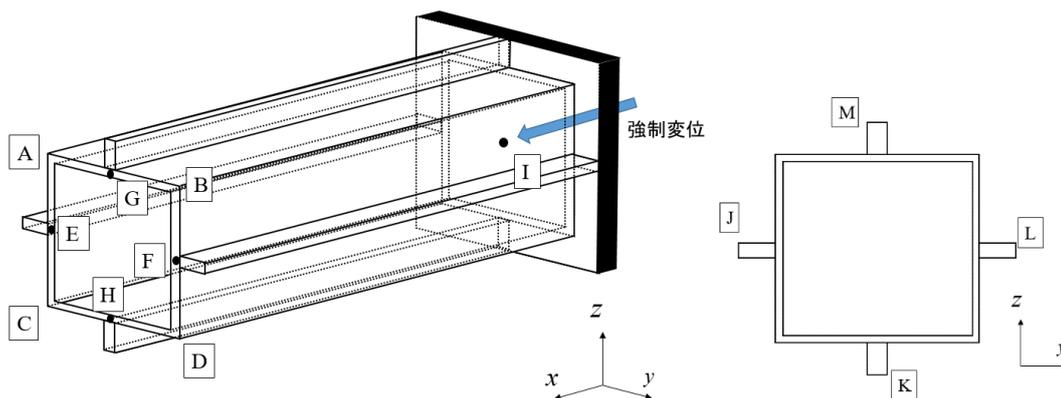
識別 番号	部材断面	$\frac{H}{B}$	$\frac{\sigma_{wtu}}{\sigma_{0.2}}$	$\frac{\sigma_{flu}}{\sigma_{0.2}}$	b_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	b_r (mm)	t_r (mm)
26	内側が縦補剛 された箱型断面	1.0	0.80	0.80	241.9	4.1	241.9	4.1	33.6	5.4
27	外側が縦補剛 された箱型断面	1.0	0.80	0.80	241.9	4.1	241.9	4.1	33.6	5.4
28	I型断面	1.0	0.80	0.80	228.3	3.8	123.1	10.8	31.7	5.1
29		2.0	0.80	0.80	478.7	8.0	121.0	10.7	66.5	10.6

5.2 解析対象と境界条件

箱型断面部材の解析対象を図 5.2, その境界条件を表 5.2 に示す. この境界条件は, 3.2 節の箱型断面部材の z 軸回りの境界条件 [表 3.2(a) 参照] と同じである.



(a) 内側が縦補剛された場合



(b) 外側が縦補された場合

図 5.2 箱型断面部材の解析モデル

表 5.2 箱型断面部材の境界条件

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
点 I	強制変位	固定	固定	固定	固定	-
辺 AC, CD, DB, AB GM, FL, HK, EJ	固定	-	-	-	固定	固定
点 E, F	-	-	固定	-	-	-

I 型断面部材の解析対象を図 5.3, その境界条件を表 5.3 に示す. この境界条件は, 4.1 節の I 型断面部材の境界条件 [表 4.1 参照] と同じである.

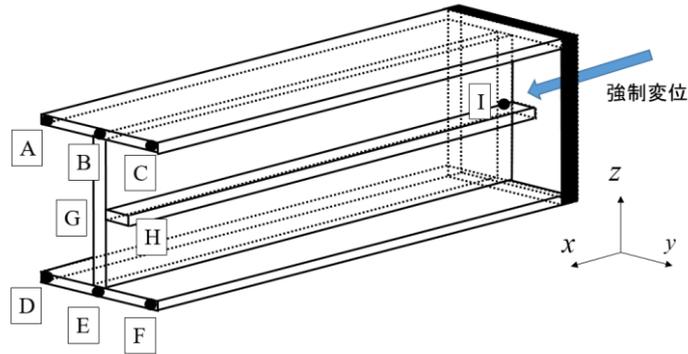


図 5.3 I 型断面部材の解析モデル

表 5.3 I 型断面部材の境界条件

(a) z 軸回り

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
点 I	強制変位	固定	固定	固定	固定	-
辺 AC, BE, DF, GH	固定	-	-	-	固定	固定
点 B, E	-	-	固定	-	-	-

(b) y 軸回り

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
点 I	強制変位	固定	固定	固定	-	固定
辺 AC, BE, DF, GH	固定	-	-	-	固定	固定
点 B, E	-	固定	-	-	-	-

5.3 初期たわみ

箱型断面部材の初期たわみは、ウェブとフランジの面外方向の初期たわみを与える式(3.12)と(3.13)を次のように変更することにより、式(3.2)～(3.13)で与えられる。

$$v_{0l} = \pm \frac{b_w}{150} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi z}{b_w + t_f}\right) \quad (5.5)$$

$$w_{0l} = \pm \frac{b_f}{150} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_f + t_w}\right) \quad (5.6)$$

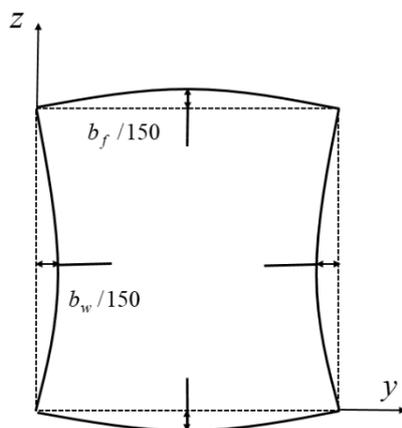
式(5.5)と(5.6)の a は、次式で与えられる、縦補剛された両縁支持板の座屈波長である¹⁸⁾。

$$a = b_w \left\{ 1 + \frac{8(1 - \mu^2)(b_r/t_r)^3(t_r/t_w)^4}{b_w/t_w} \right\}^{0.25} \quad (5.7)$$

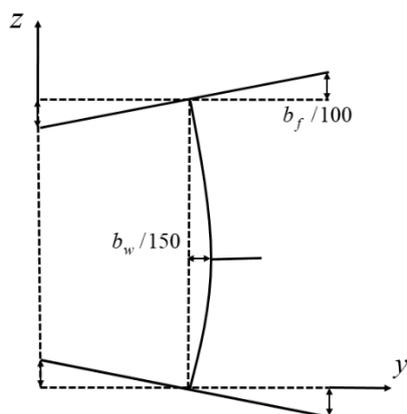
式(5.5)と(5.6)の右辺の±は、図 5.4 (a) に示す初期たわみ形状に対応して+か-とする。

I 型断面部材の初期たわみは、ウェブの面外方向の初期たわみを与える式(3.12)を式(5.5)、フランジの面外方向の初期たわみを与える式(3.13)を式(4.1)に変更することにより、式(3.2)

～(3.13)で与えられる。ウェブの面外方向の初期たわみを与える式(5.5)に対して+のみを考慮し，フランジの面外方向の初期たわみを与える式(4.1)の右辺は，**図 5.4 (b)**を参照して，上フランジには+，下フランジには-を適用する。



(a) 箱型断面

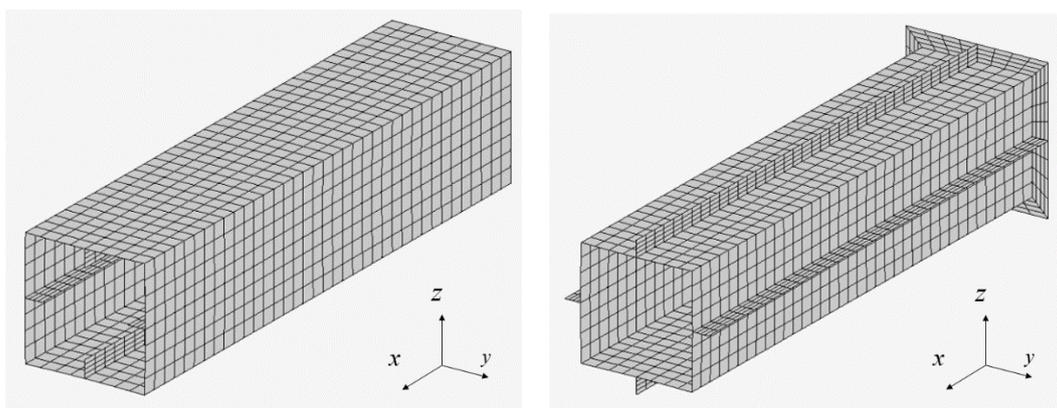


(b) I型断面

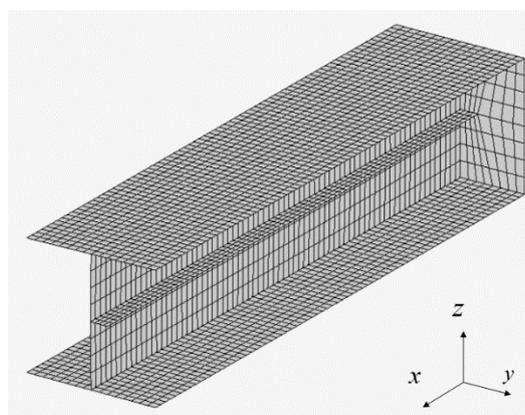
図 5.4 縦補剛された部材のウェブとフランジの面外方向の初期たわみ形状

5.4 要素分割

要素分割を**図 5.5**に示す。箱型断面部材とI型断面部材は，それぞれ，**3.4節**と**4.3節**の要素分割に従う。縦補剛材の要素分割は幅方向を4等分割する。部材端に設けられる剛板の要素は，ウェブおよび縦補剛材との連続性より台形とする。



(a) 箱型断面部材



(b) I型断面部材

図 5.5 要素分割

5.5 Q の値

図 5.2 の箱型断面部材および図 5.3 の I 型断面部材に対して、全体座屈を生じさせない境界条件を表 5.4 に示す。箱型断面部材の境界条件は、3.6 節の表 3.9 と同じであり、I 型断面部材の境界条件は、4.5 節の表 4.4 と同じである。

表 5.4 全体座屈を生じさせない境界条件

(a) 箱型断面部材

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
点 I	強制変位	固定	固定	固定	固定	固定
辺 AC, CD, DB, AB GM, FL, HK, EJ	固定	-	-	-	固定	固定
点 E, F	-	-	固定	-	-	-
点 G, H	-	固定	-	-	-	-

(b) I型断面部材

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
点 I	強制変位	固定	固定	固定	固定	固定
辺 AC, BE, DF, GH	固定	-	-	-	固定	固定
点 B, E	-	固定	固定	-	-	-

表 5.1 の識別番号 26~29 の部材に対する Q の値を表 5.5 に示す. 部材長を $l = 5a$ として解析している. I 型断面部材の λ の値は, y 軸 (強軸) 回りに対するものである.

表 5.5 Q の値

識別番号	$l(\text{mm})$	λ [y 軸 (強軸) 回り]	Q
26	3751.854	0.730	0.793
27	3751.854	0.703	0.790
28	3541.477	0.594	0.859
29	7424.995	0.702	0.846

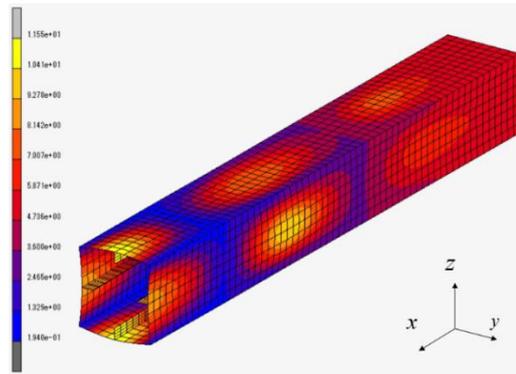
縦補剛された箱型断面部材の短柱強度を式(3.18)および縦補剛された I 型断面部材の短柱強度を式(4.4)で推定した結果を表 5.6 に示す. 推定の際, 縦補剛材の断面積も算入する.

箱型断面部材の場合, 推定値は解析値にほぼ等しい. I 型断面部材の場合, 推定値は解析値より 7%程度小さい.

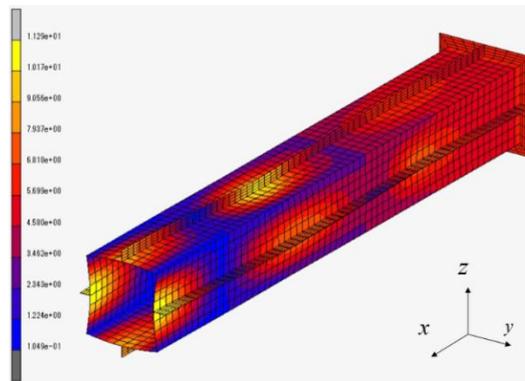
表 5.6 Q の推定値と解析値の比較

識別番号	部材断面	$\frac{H}{B}$	$\frac{\sigma_{wlu}}{\sigma_{0.2}}$	$\frac{\sigma_{flu}}{\sigma_{0.2}}$	Q		推定値 解析値
					推定値	解析値	
26	内側が縦補剛された箱型断面	1.0	0.80	0.80	0.80	0.793	1.009
27	外側が縦補剛された箱型断面	1.0	0.80	0.80	0.80	0.790	1.013
28	I 型断面	1.0	0.80	0.80	0.80	0.859	0.931
29		2.0	0.80	0.80	0.80	0.846	0.946

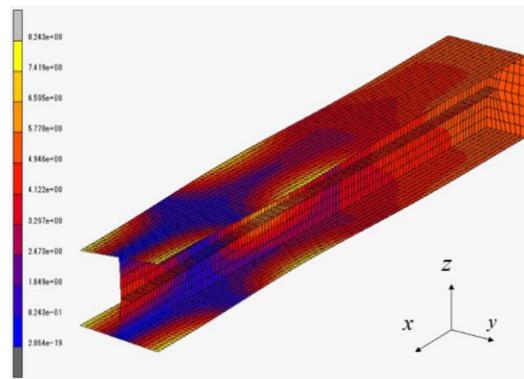
表 5.1 の識別番号 26, 27, 28 の断面寸法 ($A6061-T6$, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$) の終局時の変形を図 5.6 に示す. 縦補剛された板要素が, 縦補剛材と一体となって面外方向に変形している.



(a) 内側が縦補剛された箱型断面部材 ($\lambda = 0.730$)



(b) 外側が縦補剛された箱型断面部材 ($\lambda = 0.703$)



(c) I型断面部材 ($\lambda = 0.594$)

図 5.6 終局時の変形

(A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 1.0 = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, , $l = 5a$)

5.6 連成耐荷力の評価

表 5.1 の識別番号 26 と 27 の箱型断面部材に対する $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係を図 5.7 に示す. AA 基準の曲線および Q ファクター法の曲線はともに 3.7 節と同様にして与えられている. 図から分かるように, 外側が補剛された場合と内側が補剛された場合とで耐荷力に大きな違いは見られない. AA 基準の曲線は解析値よりも上を通過するが, Q ファクター法の曲線は解析値の下近くを通過する.

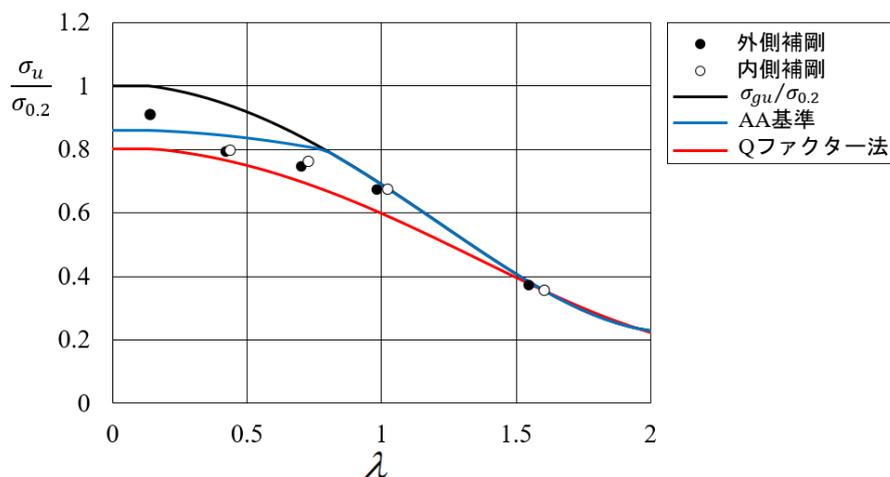
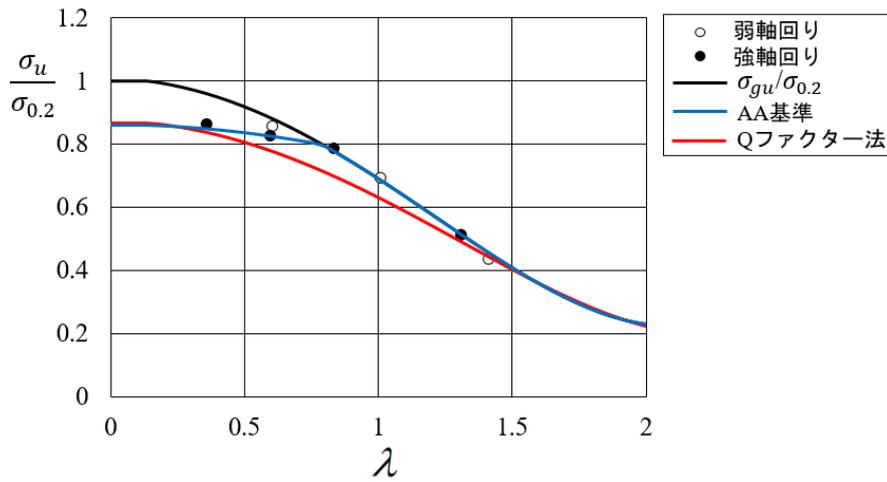


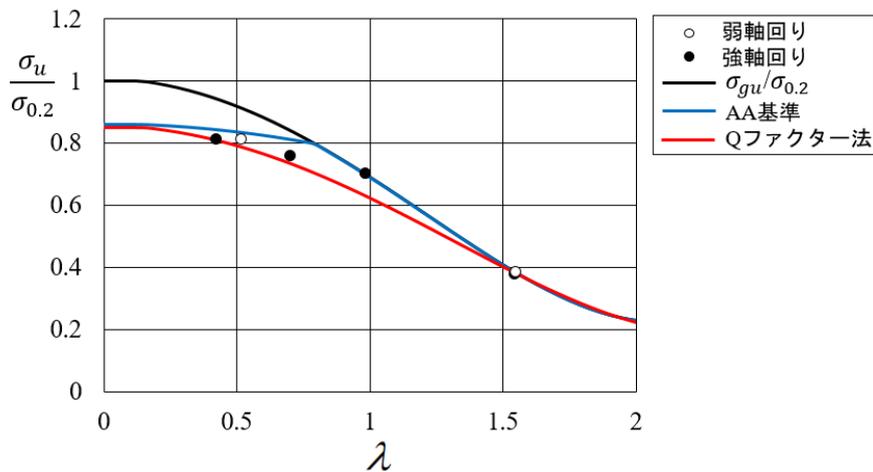
図 5.7 箱型断面部材の $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係

(A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

表 5.1 の識別番号 28 と 29 の I 型断面部材に対する $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係を図 5.8 に示す. AA 基準の曲線は, $H/B = 1.0$ の場合, 解析値の直上を通過し, $H/B = 2.0$ の場合, 解析値よりも上を通過する. Q ファクター法の曲線は, $H/B = 1.0$ と 2.0 の各場合とも, 解析値よりも下を通過する.



(a) $H/B = 1.0$



(b) $H/B = 2.0$

図 5.8 I 型断面部材の $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係
(A6061-T6, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

以上より，縦補剛された箱型断面部材および縦補剛された I 型断面部材の両者に対して，Q ファクター法による連成耐荷力評価が AA 基準のそれより優れていると言える。

5.7 縦補剛部材と無補剛部材の連成耐荷力の比較

Q ファクター法を用いて，両者の断面積が等しい縦補剛部材と無補剛部材の連成耐荷力の比較を行う。表 3.4 の識別番号 2 の無補剛の箱型断面の断面積と同じ断面積を有する縦補剛された箱型断面の寸法を表 5.7(a) に示す。縦補剛材の寸法は式(5.3)と(5.4)に従って算出され，箱型断面の内側と外側が補剛された場合が扱われている。同様に，表 4.3 の識別番号 19 の無補剛の I 型断面の断面積と同じ断面積を有する縦補剛された I 型断面の寸法を表

5.7(b)に示す。表5.7(a)と(b)の Q の値は、それぞれ式(3.18)と(4.4)によって推定された値である。

表 5.7 縦補剛部材と無補剛部材の断面寸法と諸量

(a) 箱型断面

部材 断面	b_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	b_r (mm)	t_r (mm)	$\frac{\sigma_{wlu}}{\sigma_{0.2}}$	$\frac{\sigma_{flu}}{\sigma_{0.2}}$	Q	r
無補剛	233.7	8.2	233.7	8.2	/	/	0.80	0.80	0.80	98.8
内縦補剛	233.7	6.4	233.7	6.4	51.3	8.2	0.96	0.96	0.96	92.0
外縦補剛	233.7	6.4	233.7	6.4	51.3	8.2	0.96	0.96	0.96	99.7

全断面積：無補剛 $A = 7901(\text{mm}^2)$ ，縦補剛 $A = 7797(\text{mm}^2)$

(b) I型断面

部材 断面	b_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	b_r (mm)	t_r (mm)	$\frac{\sigma_{wlu}}{\sigma_{0.2}}$	$\frac{\sigma_{flu}}{\sigma_{0.2}}$	Q	r_y	r_z
無補剛	228.7	8.0	121.0	10.7	/	/	0.80	0.80	0.80	108.5	62.3
縦補剛	228.7	6.2	121.9	10.7	50.2	8.0	0.96	0.79	0.89	107.4	62.4

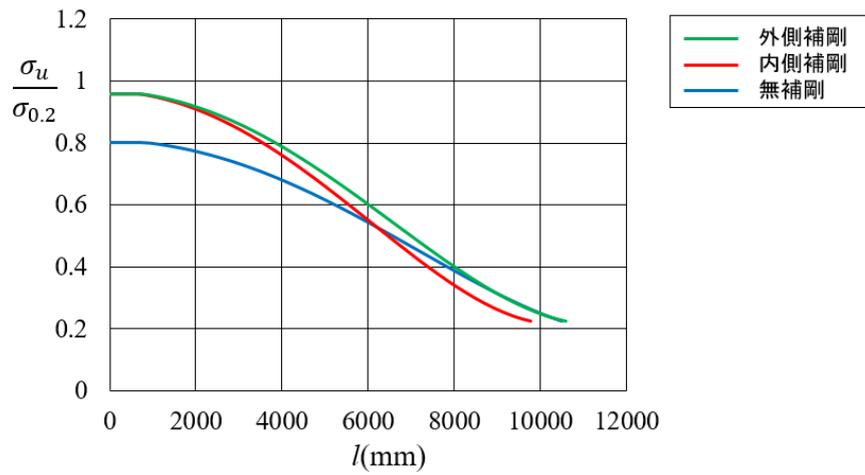
全断面積：無補剛 $A = 7157(\text{mm}^2)$ ，縦補剛 $A = 7157(\text{mm}^2)$

r_y ：強軸回り， r_z ：弱軸回り

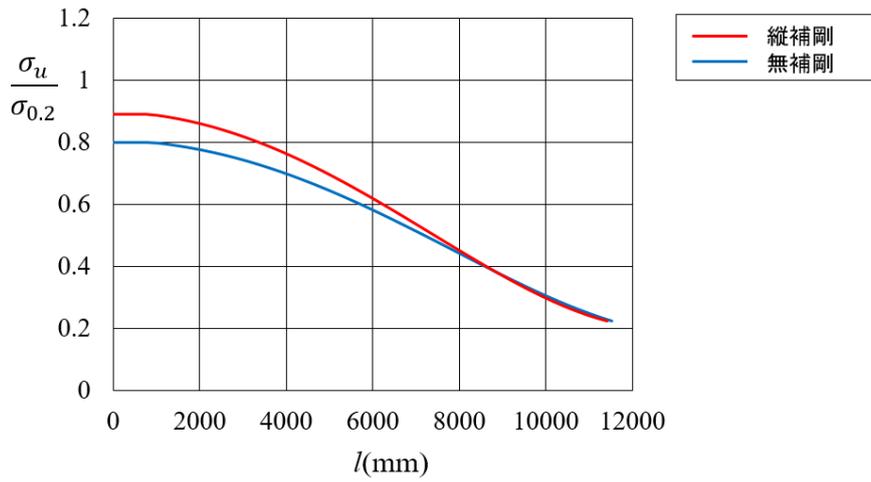
表 5.7 に示す断面寸法を有する部材に対して、式(2.2)の Q ファクター法を用いて推定された圧縮部材の $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と l の関係を図 5.9 に示す。式(2.2)の圧縮部材の全体座屈に対する耐荷力を与える関数には式(3.16)が用いられ、 Q には表 5.7 に示す値が用いられている。

図 5.9 から分かるように、箱型断面部材およびI型断面部材ともに、部材長が短いときには、縦補剛された部材の連成耐荷力が無補剛のそれより大きくなるが、部材長が長くなるに従って、両者の連成耐荷力は近づき、最終的には、縦補剛された部材の連成耐荷力が無補剛のそれより低くなる。

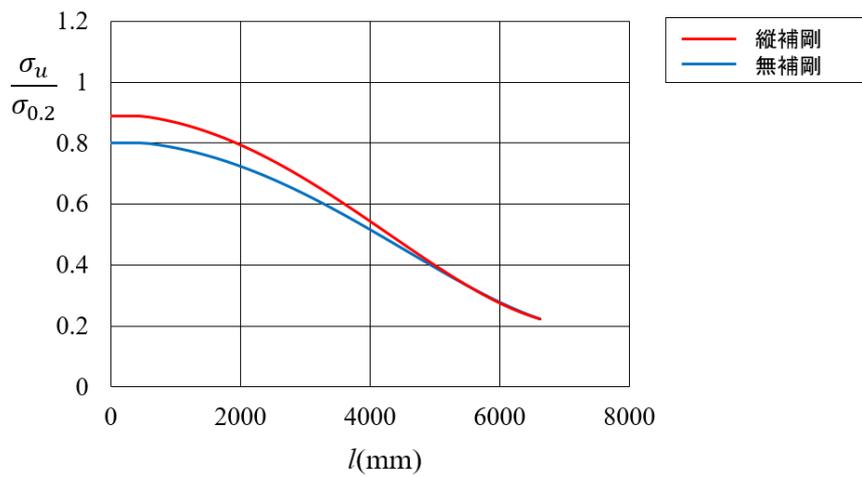
他方、図 5.9 (a) に示すように、 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と l の関係においては、外側補剛された箱型断面部材の耐荷力が内側補剛された箱型断面部材の耐荷力より大きい。図 5.7 に示したように、 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と λ の関係においては、両者の耐荷力に大きな相違は見られなかった。これは、式(3.17)から分かるように、細長比パラメータ λ に含まれる回転半径 r の値が、外側補剛された場合の値が内側補剛された場合の値より大きいからである。



(a) 箱型断面部材



(b) 強軸回りに座屈する I 型断面部材



(c) 弱軸回りに座屈する I 型断面部材

図 5.9 $\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}}$ と l の関係

第 6 章 結論

本研究では、圧縮を受けるアルミニウム合金部材の全体と局所の連成耐荷力の評価法として、米国のアルミニウム協会が制定したアルミニウム構造物の設計基準で採用されている方法と欧州のアルミニウム構造物の設計基準 Eurocode 9 で採用されている Q ファクター法のうち、どちらの方法が優れているかを明らかにした。取扱ったアルミニウム合金部材は、箱型断面、I 型断面ならびに縦補剛された箱型断面および I 型断面の部材であり、これらの部材に対して有限要素法による弾塑性有限変位解析を行い、解析結果と前述の二つの評価法とを比較することによって、どちらが優れているかを検討した。主な結論は次の通りである。

- (1) 解析された全ての場合に対して、Q ファクター法によって推定される連成耐荷力は、解析値の下近傍を通過するが、AA 基準によって推定される連成耐荷力は、解析値に近い場合もあるが、解析値を大きく上回る場合あるいは下回る場合がある。したがって、Q ファクター法による連成耐荷力評価が AA 基準のそれより優れていると言える。
- (2) 全体座屈が生じない短柱の圧縮耐荷力として与えられる Q の値は、I 型断面部材の短柱の解析においては、部材長が短い場合、部材端に設けられた剛板によるフランジおよびウェブの面外変形に対する拘束の影響が大きく表れ、 Q の値を大きく算出する。この影響を小さくするためには部材長を長くする必要があるが、部材長を長くすると全体座屈が生じる。そこで、部材に全体座屈を生じさせない境界条件を課し、さらに全体座屈に対する初期たわみを与えず、ウェブとフランジの面外方向の初期たわみだけを与えて解析する方法を新たに考案した。
- (3) 次式によって推定される短柱の圧縮耐荷力 Q は解析値を安全側で評価する。

$$Q = \frac{\sum \frac{\sigma_{ilu}}{\sigma_{0.2}} A_i}{\sum A_i}$$

ここに、 σ_{ilu} : 部材を構成する板要素の圧縮耐荷力

$\sigma_{0.2}$: 0.2% 耐力

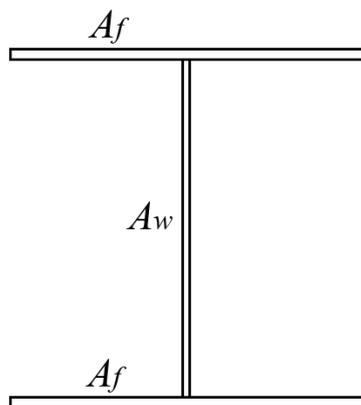
A_i : 部材を構成する板要素の断面積

板要素 i が両縁支持板、自由突出板、縦補剛された A6061-T6 両縁支持板に対して、それぞれ式(3.14), (4.2), (5.1)を σ_{ilu} に用いる。

例として、上式の適用の仕方を下図の I 型断面部材を次に示す。

$$Q = \frac{\frac{\sigma_{wlu}}{\sigma_{0.2}} A_w + 2 \frac{\sigma_{flu}}{\sigma_{0.2}} A_f}{A_w + 2A_f}$$

ここに, σ_{wlu} : 式(3.14)で与えられるウェブの局部座屈に対する圧縮耐荷力
 σ_{flu} : 式(4.2)で与えられるフランジの局部座屈に対する圧縮耐荷力
 A_w, A_f : それぞれ, ウェブとフランジの各 1 枚の断面積



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) 大倉一郎, 長尾隆史, 豊田英治：道路橋用アルミニウム床版の開発, 橋梁と基礎, 建設図書, 第 50 巻, 第 3 号, pp.26-30, 2016.
- 3) 鈴木勝, 玉越隆史, 沢田道彦：緊急仮設橋の開発について, 橋梁と基礎, 建設図書, 第 49 巻, 第 11 号, pp.46-51, 2015.
- 4) 飛沫帯の栈橋でアルミ床版を供用, 日経コンストラクション, 10/09 号, p.25, 2017.
- 5) 土木学会, 鋼構造委員会, 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：アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）, 2015.
- 6) 大倉一郎：アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針 改訂試案 1, ALST 研究レポート, No.55, 2019.
- 7) Aluminum Association: Aluminum Design Manual, PART I, Specification for Aluminum Structures, 2010.
- 8) Eurocode 9: Design of aluminum structures – Part1-1: General structural rules, 2007.
- 9) Maurice L. Sharp: Behavior and Design of Aluminum Structures, McGraw-Hill, Inc., pp.130-133, 1993.
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I共通編 II鋼橋編, pp.131-136, 2012.
- 11) 大倉一郎, 長尾隆史, 石川敏之, 萩澤亘保, 大隅心平：構造物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.
- 12) JIS H 4000：アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条, 2014.
- 13) JIS H 4100：アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材, 2015.
- 14) MSC. Software Corporation: Marc Mentat 2014.0.0.
- 15) 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.
- 16) 山田了平, 大倉一郎：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, No.37, 2014.
- 17) 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.
- 18) 西井智紀, 大倉一郎：圧縮を受ける縦補剛されたアルミニウム合金板の最適断面形状と耐荷力, No.48, 2017.

付録 数値データ

識別番号 1 (箱型, A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.9$)

短柱強度

l(mm)	Λ	Q
229.723	0.044	0.954
689.168	0.132	0.906

圧縮耐荷力

l(mm)	Λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
1148.613	0.221	0.894
2067.504	0.397	0.875
2986.395	0.574	0.844
3905.286	0.750	0.798
4824.177	0.927	0.729
5743.067	1.103	0.627
6661.958	1.280	0.514

識別番号 2 (箱型, A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

短柱強度

l(mm)	Λ	Q
233.662	0.045	0.884
700.987	0.134	0.801

圧縮耐荷力

l(mm)	Λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
1168.311	0.223	0.785
2102.96	0.401	0.772
3037.608	0.579	0.752
3972.257	0.757	0.719
4906.906	0.935	0.662
5841.555	1.114	0.580
6776.203	1.292	0.484

識別番号 3 (箱型, A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 1.0$)

短柱強度

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	Q	$l(\text{mm})$	λ	Q
665.817	0.121	0.931	665.817	0.137	0.931

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
1109.696	0.202	0.951	1109.696	0.229	0.912
1997.452	0.364	0.901	1997.452	0.412	0.887
2885.208	0.525	0.869	2885.208	0.595	0.850
3772.965	0.687	0.829	3772.965	0.779	0.797
5548.478	1.010	0.696	5548.478	1.145	0.603
7323.991	1.333	0.485	7323.991	1.512	0.387

識別番号 4 (箱型, A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.7$)

短柱強度

$l(\text{mm})$	λ	Q
236.320	0.045	0.802271
708.960	0.134	0.703

圧縮耐荷力

$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
1181.600	0.224	0.681
2126.880	0.403	0.667
3072.159	0.583	0.651
4017.439	0.762	0.625
4962.719	0.941	0.582
5907.999	1.120	0.518
6853.279	1.300	0.441

識別番号 5 (箱型, A6061-T6, $H/B = 1.5$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

短柱強度

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	Q	$l(\text{mm})$	λ	Q
1077.829	0.152	0.831	359.2763	0.063	0.896
			1077.829	0.190	0.828

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
1796.382	0.254	0.818	1796.382	0.317	0.806
3233.487	0.457	0.806	2514.934	0.443	0.790
4670.592	0.661	0.781	3233.487	0.570	0.770
6107.697	0.864	0.733	4670.592	0.823	0.707
8981.908	1.271	0.526	6107.697	1.077	0.596

識別番号 6 (箱型, A6061-T6, $H/B = 1.5$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.97$)

短柱強度

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	Q	$l(\text{mm})$	λ	Q
1051.480	0.141	0.900	1051.480	0.194	0.895

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
1752.466	0.235	0.893	1752.466	0.323	0.880
3154.44	0.423	0.876	2453.453	0.453	0.861
4556.413	0.612	0.842	3154.44	0.582	0.836
5958.386	0.800	0.792	3855.426	0.711	0.803
8762.332	1.176	0.596	4556.413	0.840	0.759
			7360.359	1.358	0.463

識別番号 7 (箱型, A6061-T6, $H/B = 2.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 1.0$)

短柱強度

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	Q	$l(\text{mm})$	λ	Q
467.324	0.049	0.924	467.324	0.085	0.935
1401.973	0.147	0.903	1401.973	0.255	0.893

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
2336.622	0.245	0.897	2336.622	0.425	0.865
4205.919	0.423	0.877	3271.271	0.595	0.833
6075.217	0.637	0.838	4205.919	0.765	0.785
7944.514	0.833	0.780	6075.217	1.105	0.613
11683.109	1.225	0.560	7944.514	1.445	0.413
15421.704	1.617	0.351			

識別番号 8 (箱型, A6061-T6, $H/B = 2.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

短柱強度

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	Q	$l(\text{mm})$	λ	Q
484.890	0.055	0.895	484.890	0.083	0.838
1454.671	0.166	0.834	1454.671	0.250	0.823

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
2424.452	0.277	0.820	2424.452	0.416	0.788
4364.014	0.498	0.785	3394.233	0.583	0.760
6303.575	0.719	0.772	4364.014	0.749	0.720
8243.137	0.94	0.707	5333.795	0.916	0.661
10182.700	1.161	0.593	7273.356	1.249	0.500

識別番号 9 (箱型, A6061-T6, $H/B = 2.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.7$)

短柱強度

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	Q	$l(\text{mm})$	λ	Q
1462.504	0.170	0.823	1462.504	0.249	0.815

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
2437.506	0.283	0.811	2437.506	0.414	0.778
4387.511	0.509	0.795	3412.509	0.580	0.744
6337.516	0.736	0.762	4387.511	0.746	0.710
8287.521	0.962	0.696	6337.516	1.078	0.575
12187.531	1.415	0.440			

識別番号 10, 11, 12, 13, 14 (箱型, A6061-T6, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 0.8$,)

短柱強度

$H/B = 2.0$, $\sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.7$

識別 番号	$\frac{H}{B}$	$\frac{\sigma_{ftu}}{\sigma_{0.2}}$	y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
			$l(\text{mm})$	λ	Q	$l(\text{mm})$	λ	Q
10	1.1	0.85	771.085	0.135	0.828	771.085	0.146	0.827
11	1.2	0.89	841.184	0.137	0.856	841.184	0.158	0.853
12	1.3	0.92	911.283	0.138	0.872	911.283	0.170	0.872
13	1.4	0.95	981.381	0.140	0.883	981.381	0.182	0.881
14	1.7	1.00	1191.677	0.144	0.897	1191.677	0.218	0.896

識別番号 15 (箱型, A5083-O, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.9$)

短柱強度

$l(\text{mm})$	λ	Q
697.661	0.095	0.911

圧縮耐荷力

$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
1162.769	0.159	0.898
1627.876	0.222	0.891
2092.984	0.286	0.882
3023.199	0.413	0.843
3953.414	0.540	0.780
4883.628	0.666	0.710
6744.058	0.920	0.571
8604.488	1.174	0.452

識別番号 16 (箱型, A5083-O, $H/B = 1.5$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.97$)

短柱強度

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	Q	$l(\text{mm})$	λ	Q
1061.657	0.101	0.900	1061.657	0.139	0.895

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
1769.429	0.169	0.888	1769.429	0.232	0.872
3184.972	0.304	0.875	2477.201	0.324	0.840
4600.516	0.439	0.838	3184.972	0.417	0.815
6016.059	0.574	0.771	3892.744	0.510	0.773
7431.602	0.709	0.693	4600.516	0.602	0.726
10262.689	0.979	0.546	7431.602	0.973	0.540

識別番号 17 (箱型, A5083-O, $H/B = 2.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.7$)

短柱強度

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	Q	$l(\text{mm})$	λ	Q
1467.191	0.121	0.826	1467.191	0.177	0.823

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
2445.318	0.202	0.815	2445.318	0.294	0.776
4401.573	0.363	0.803	3423.446	0.412	0.741
6357.827	0.525	0.765	4401.573	0.530	0.690
8314.082	0.686	0.693	5379.700	0.648	0.650
10270.337	0.848	0.609	9292.209	1.119	0.457
14182.846	1.171	0.456			

識別番号 18 (I 型, A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 1.0$)

短柱強度

$l(\text{mm})$	λ [y 軸 (強軸) 回り]	Q
1902.624	0.327	0.995

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
1057.013	0.182	0.972	1057.013	0.297	0.972
1902.624	0.327	0.959	1902.624	0.535	0.919
3171.040	0.545	0.903	2748.235	0.773	0.842
4439.456	0.763	0.840	3593.846	1.011	0.710
6130.678	1.054	0.692	5285.067	1.486	0.403
8667.510	1.490	0.413			

識別番号 19 (I 型, A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

短柱強度

$l(\text{mm})$	λ [y 軸 (強軸) 回り]	Q
1143.427	0.198	0.889
2058.168	0.357	0.891
2972.909	0.516	0.893
4345.021	0.754	0.883
6174.504	1.071	0.892

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
1143.427	0.198	0.885	1143.427	0.346	0.880
2058.168	0.357	0.880	1600.797	0.484	0.878
2972.909	0.516	0.866	2515.539	0.761	0.826
4345.021	0.754	0.818	3430.280	1.037	0.683
6174.504	1.071	0.679	5259.763	1.590	0.355

識別番号 20 (I 型, A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = 1.0$, $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

短柱強度

$l(\text{mm})$	λ [y 軸 (強軸) 回り]	Q
2062.701	0.377	0.955
4812.969	0.880	0.955
5729.726	1.048	0.954
6646.482	1.216	0.945
7563.238	1.383	0.941

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
687.567	0.126	0.973	687.567	0.227	0.977
1145.945	0.210	0.951	1145.945	0.378	0.940
2062.701	0.377	0.931	2062.701	0.681	0.875
3896.213	0.713	0.860	3437.835	1.135	0.615
5729.726	1.048	0.704	5271.347	1.741	0.301
9396.750	1.719	0.323			

識別番号 21 (I 型, A6061-T6, $H/B = 2.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 0.8$, $\sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 1.0$)

短柱強度

$l(\text{mm})$	λ [y 軸 (強軸) 回り]	Q
4165.208	0.392	0.922

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
2314.005	0.218	0.921	462.801	0.162	0.940
4165.208	0.392	0.904	1388.403	0.486	0.914
6016.412	0.566	0.874	2314.005	0.810	0.799
7867.616	0.740	0.832	4165.208	1.458	0.419
11570.020	1.088	0.672			

識別番号 22 (I 型, A6061-T6, $H/B = 2.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

短柱強度

$l(\text{mm})$	λ [y 軸 (強軸) 回り]	Q
4315.117	0.434	0.815

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
2397.287	0.241	0.814	479.457	0.199663	0.86419
4315.117	0.434	0.804	1438.372	0.598988	0.824
6232.947	0.627	0.787	2397.287	0.998313	0.663147
8150.777	0.820	0.752	4315.117	1.796963	0.27528
11986.437	1.205	0.562			

識別番号 23 (I 型, A6061-T6, $H/B = 2.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = 1.0$, $\sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

短柱強度

$l(\text{mm})$	λ [y 軸 (強軸) 回り]	Q
4324.622	0.471	0.951

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
2402.568	0.262	0.938	480.514	0.241	0.964
4324.622	0.471	0.909	1441.541	0.723	0.864
6246.676	0.680	0.852	2402.568	1.205	0.546
8168.730	0.890	0.777	3363.595	1.688	0.314

識別番号 24 (I 型, A5083-O, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{ftu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

短柱強度

$l(\text{mm})$	λ [y 軸 (強軸) 回り]	Q
2078.263	0.256	0.928

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
l(mm)	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	l(mm)	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
1154.591	0.142	0.923	1154.591	0.248467	0.913
2078.263	0.256	0.915	2078.263	0.447241	0.873
3001.936	0.369	0.915	3001.936	0.646015	0.771
3925.609	0.483	0.837	4387.445	0.944175	0.581
5311.118	0.653	0.740	5772.954	1.242336	0.430

識別番号 25 (I 型, A5083-O, $H/B = 2.0$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

短柱強度

l(mm)	λ [y 軸 (強軸) 回り]	Q
4333.544	0.308	0.825

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
l(mm)	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	l(mm)	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
1154.591	0.171	0.828	481.505	0.141	0.870
4333.544	0.308	0.819	1444.515	0.424	0.837
6259.564	0.446	0.798	2407.525	0.707	0.709
8185.584	0.583	0.749	3370.534	0.990	0.555
12037.623	0.857	0.605			

識別番号 26 (内側補剛の箱型, A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wlu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

短柱強度

l(mm)	λ	Q
3751.854	0.730	0.793

圧縮耐荷力

l(mm)	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
2251.112	0.438	0.799
3751.854	0.730	0.761
5252.595	1.021	0.673
8254.078	1.605	0.355

識別番号 27 (外側補剛の箱型, A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

短柱強度

$l(\text{mm})$	λ	Q
3751.854	0.703	0.790

圧縮耐荷力

$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
750.371	0.141	0.90940857
2251.112	0.422	0.794
3751.854	0.703	0.748
5252.595	0.985	0.674
8254.078	1.548	0.374

識別番号 28 (縦補剛された I 型, A6061-T6, $H/B = 1.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

短柱強度

$l(\text{mm})$	λ [y 軸 (強軸) 回り]	Q
3541.477	0.594	0.859

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
708.295	0.119	0.871	708.295	0.201	0.865
2124.886	0.356	0.863	2124.886	0.604	0.856
3541.477	0.594	0.828	3541.477	1.007	0.694
4958.067	0.832	0.786	4958.067	1.410	0.436
7791.248	1.307	0.514			

識別番号 29 (縦補剛された I 型, A6061-T6, $H/B = 2.0$, $\sigma_{wtu}/\sigma_{0.2} = \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} = 0.8$)

短柱強度

$l(\text{mm})$	λ [y 軸 (強軸) 回り]	Q
7424.995	0.702	0.846

圧縮耐荷力

y 軸 (強軸) 回り			z 軸 (弱軸) 回り		
$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$	$l(\text{mm})$	λ	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
1484.999	0.140	0.910	1484.999	0.516	0.814
4454.997	0.421	0.815	4454.997	1.548	0.345
7424.995	0.702	0.759			
10394.993	0.982	0.705			
16334.989	1.543	0.381			