

フランジの局部座屈がアルミニウム合金桁の
横倒れ耐荷力に及ぼす影響

ALST 研究レポート 50

2017 年 3 月

大阪大学大学院工学研究科

藤井裕基, 大倉一郎

概要

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、フランジの局部座屈がアルミニウム合金桁の横倒れ耐荷力に及ぼす影響を明らかにする。

目次

第 1 章	序論	・ ・ ・	1
第 2 章	圧縮を受ける平板部材の連成座屈強度	・ ・ ・	3
	2.1 圧縮を受ける平板部材	・ ・ ・	3
	2.2 連成座屈強度の評価式	・ ・ ・	3
	2.3 平板部材の全体座屈および局部座屈に対する耐荷力	・ ・ ・	4
	2.4 FEM による圧縮を受ける平板部材の弾塑性有限変位解析	・ ・ ・	6
	2.5 圧縮を受ける平板部材に対する連成座屈強度の評価式と 解析値の比較	・ ・ ・	9
第 3 章	曲げを受ける桁の圧縮フランジの連成座屈強度	・ ・ ・	15
	3.1 曲げを受ける桁の耐荷力	・ ・ ・	15
	3.2 FEM による曲げを受ける桁の弾塑性有限変位解析	・ ・ ・	17
	3.3 圧縮フランジに対する連成座屈強度の評価式と解析値の比較	・ ・ ・	19
	3.4 曲げを受ける桁の横倒れ耐荷力	・ ・ ・	24
第 4 章	結論	・ ・ ・	25
	参考文献	・ ・ ・	26
付録 A	圧縮を受ける平板部材に対する連成座屈強度の評価式と解析値の比較	・ ・ ・	27
付録 B	数値データ	・ ・ ・	35
付録 C	数値データ	・ ・ ・	42

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年頃からアルミニウム歩道橋（図1.1参照）および拡幅歩行者用アルミニウム床版（図1.2参照）が建設されるようになった¹⁾。2011年には道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋（図1.3参照）が建設され²⁾、さらに、2015年には津波対策用緊急仮設橋の床版にアルミニウム床版（図1.4参照）が採用された³⁾。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、床版を支持する桁もアルミニウム合金材で製作されることが期待される。



図 1.1 アルミニウム歩道橋



図 1.2 拡幅歩行者用アルミニウム床版



図 1.3 道路用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋



図 1.4 アルミニウム床板が採用された緊急仮設橋

アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）⁴⁾が2015年に制定された。しかし、この指針では、曲げを受ける桁に対してその許容応力度が規定されていない。そこで、曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力について研究が行われた^{5),6)}。しかし、この耐荷力には、フランジの局部座屈が桁の横倒れ耐荷力に及ぼす影響が考慮されていない。

本研究は、フランジの局部座屈がアルミニウム合金桁の横倒れ耐荷力に及ぼす影響を明らかにする。

第2章 圧縮を受ける平板部材の連成座屈強度

2.1 圧縮を受ける平板部材

図 2.1 に示すように、両端および破線で示される板幅中央の位置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面内方向に水平座屈する場合の耐荷力が、曲げを受ける桁の横倒れ耐荷力に用いられた^{5),6)}。しかし、この平板部材の水平耐荷力には、平板部材が面外方向に座屈する場合、すなわち平板部材の局部座屈の影響が考慮されなかった。そこで、平板部材の面外方向に生じる局部座屈が、面内方向に生じる水平座屈に及ぼす影響、すなわち圧縮を受ける平板部材の連成座屈強度について調べる。

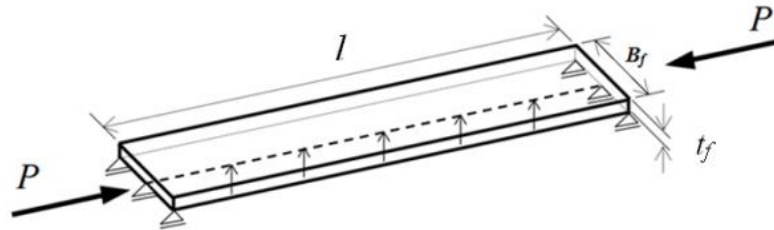


図 2.1 圧縮を受ける平板部材

2.2 連成座屈強度の評価式

部材の全体座屈と局部座屈の連成座屈強度の評価式として次の四つが挙げられる。

- 1) 米国の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 (AA 基準)⁷⁾で採用されている連成座屈強度の評価式。

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

ここに、 σ_u : 部材の耐荷力
 σ_{gu} : 部材の全体座屈に対する耐荷力
 σ_{lu} : 部材の局部座屈に対する耐荷力

- 2) Q ファクター法. 欧州のアルミニウム構造部の設計基準である Eurocode 9⁸⁾で採用されている連成座屈強度の評価式。

$$\sigma_u = \sigma_{lu} f(\lambda_{lu}) \quad (2.2)$$

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

ここに、 $f(\lambda_{lu})$: 全体座屈に対する耐荷力を与える関数

λ_{lu} : アルミニウム合金の 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ を部材の局部座屈に対する耐荷力 σ_{lu} で置き換えた細長比パラメータ

E : ヤング率

l : 部材長

r : 部材断面の回転半径

- 3) 積公式. 道路橋示方書⁹⁾において, 圧縮を受ける部材の連成座屈強度の評価式として用いられている.

$$\sigma_u = \sigma_{gu} \frac{\sigma_{lu}}{\sigma_{0.2}} \quad (2.4)$$

- 4) ミニマム法. 道路橋示方書⁹⁾において, 曲げを受ける桁の圧縮フランジの連成座屈強度の評価式として用いられている.

$$\sigma_u = \min(\sigma_{gu}, \sigma_{lu}) \quad (2.5)$$

2.3 平板部材の全体座屈および局部座屈に対する耐荷力

図 2.1 に示す, 圧縮を受ける平板部材が平面を保って水平方向に座屈する場合, すなわち全体座屈する場合に対する耐荷力が次式で与えられている^{5),6)}.

$$\frac{\sigma_{gu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda_f \leq \lambda_1) \\ a_0 + a_1 \lambda_f + a_2 \lambda_f^2 + a_3 \lambda_f^3 + a_4 \lambda_f^4 & (\lambda_1 \leq \lambda_f \leq 2) \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\lambda_f = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{B_f} \quad (2.7)$$

ここに, σ_{gu} : 圧縮を受ける平板部材が水平方向に全体座屈する場合の耐荷力

λ_f : 平板部材の細長比パラメータ

$\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力

E : ヤング率

l : 平板部材の長さ

B_f : 平板部材の全幅

λ_1 と $a_0 \sim a_4$: 表 2.1 に示す値の定数

式(2.6)が与える耐荷力曲線を図 2.2 に示す.

表 2.1 $\lambda_1, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$ の値

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

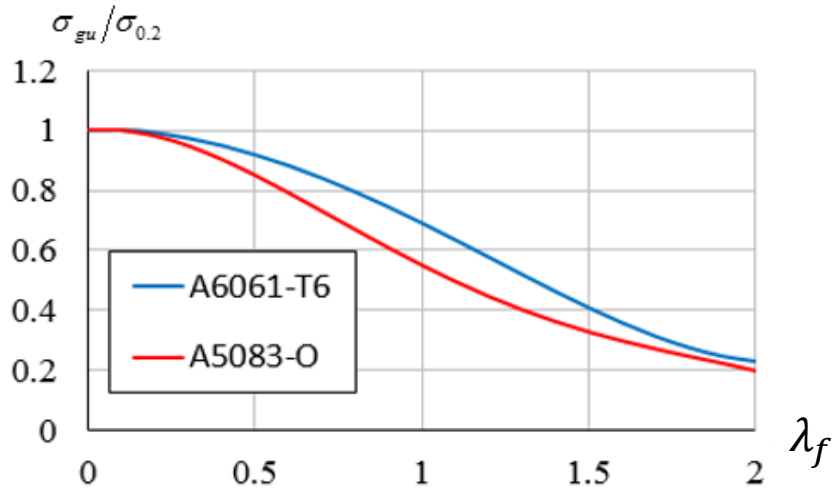


図 2.2 圧縮を受ける平板部材の全体座屈に対する耐荷力

図 2.1 に示す，圧縮を受ける平板部材が面外方向に座屈する場合，すなわち局部座屈する場合に対する耐荷力が次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\frac{\sigma_{lu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ 1 - 0.35 \left(\frac{R - R_1}{R_2 - R_1} \right)^2 & (R_1 \leq R \leq R_2) \\ 0.65 \left(\frac{R_2}{R} \right)^p & (R_2 \leq R \leq 2) \end{cases} \quad (2.8)$$

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)\sigma_{0.2}}{0.425 E}} \frac{b_f}{t_f} \quad (2.9)$$

ここに， σ_{lu} : 圧縮を受ける平板部材が面外方向に局部座屈する場合の耐荷力

R : 平板部材の幅厚比パラメータ

E : ヤング率
 M : ポアソン比
 b_f : 平板部材の半幅
 t_f : 平板部材の板厚

R_1, R_2, p : 表 2.2 に示す値の定数
 式(2.8)が与える耐荷力曲線を図 2.3 に示す.

表 2.2 R_1, R_2, m の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	R_1	R_2	p
A6061-T6	245	0.6	1.24	0.16
A5083-O	125	0.4	1.02	0.2

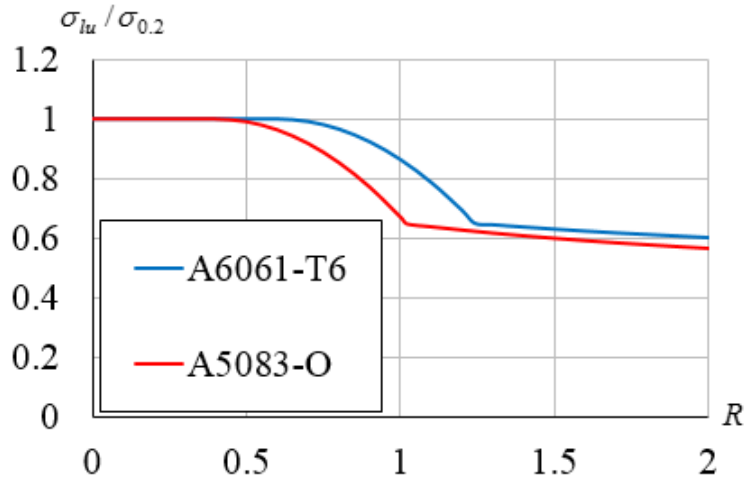


図 2.3 圧縮を受ける平板部材の局部座屈に対する耐荷力

2.4 FEM による圧縮を受ける平板部材の弾塑性有限変位解析

アルミニウム合金部材の応力-ひずみ関係は次式で与えられる.

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & (\sigma \leq \sigma_{0.2}) \\ \sigma = \sigma_{0.2} & (\sigma_{0.2} \leq \sigma) \end{cases} \quad (2.10)$$

ここに, σ と ε : 応力とひずみ
 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力
 E : ヤング率
 n : ひずみ硬化パラメータ

アルミニウム合金 A6061-T6 と A5083-O に対する 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ およびひずみ硬化パラメ

一タ n の値を表 2.3 に示す。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¹¹⁾。A6061-T6 と A5083-O に対する応力-ひずみ関係を図 2.4 に示す。

表 2.3 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

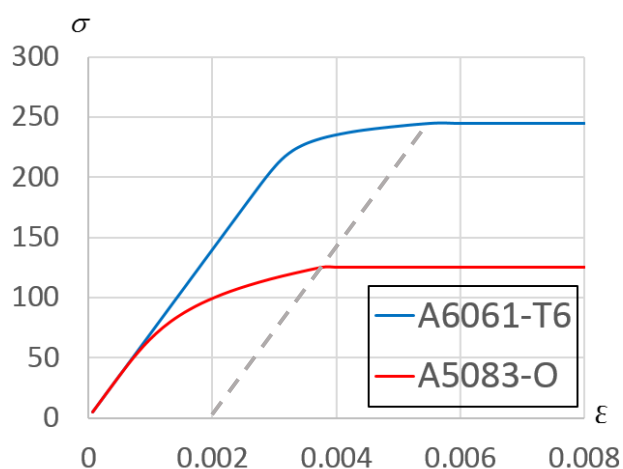


図 2.4 応力-ひずみ関係

図 2.1 に示す、圧縮を受ける平板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 MARC¹²⁾を使用する。平板部材の境界条件を表 2.4 に示す。同表の挿入図を参照して、対称性の境界条件を辺 DF に設ける。辺 AC に剛棒を設け、点 B を x 軸方向に強制変位させることにより圧縮荷重を与える。有限要素として、板に対して 8 節点シェル要素 (MARC における要素番号 22)、剛棒に対して 3 次元弾性梁要素 (MARC における要素番号 52) を使用する。

平板部材の要素分割を表 2.4 の挿入図に示す。平板部材が水平方向に全体座屈する場合、式(2.7)の λ_f が 1 の平板部材に対して、平板部材の全幅を 4, 8, 16 に等分割して得られる耐荷力は同じであることが示されている^{5),6)}。他方、平板部材が面外方向に局部座屈する場合、平板部材の半幅を 8 等分割すれば十分な精度の耐荷力が得られることが示されている¹⁰⁾。したがって、表 2.4 の挿入図に示すように、平板部材の全幅を 16 等分割し、一要素の y 軸方向に対する x 軸方向の長さが 0.9 から 1.1 の範囲になるように分割する。

表 2.4 境界条件

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
辺 AC	—	拘束	拘束	—	—	—
辺 BE	—	—	拘束	—	—	—
辺 DF	拘束	—	—	—	拘束	拘束
点 B	強制変位	—	—	—	—	—

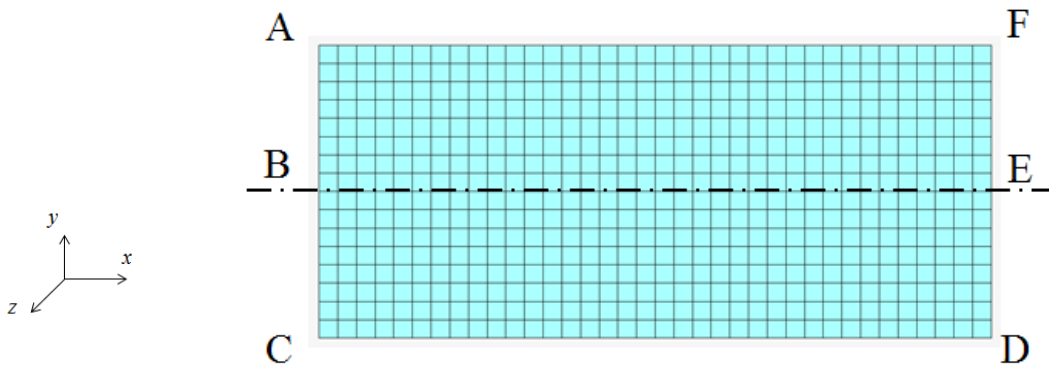


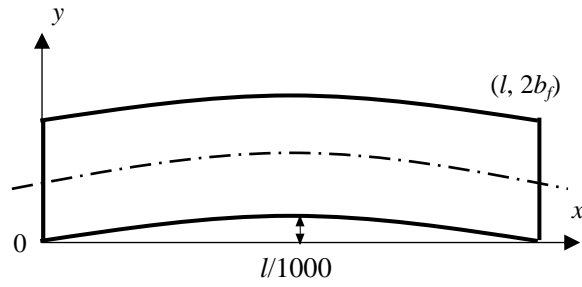
図 2.5 を参照して，平板部材が水平方向に全体座屈する場合と面外方向に局部座屈する場合に対する初期たわみとして次式を仮定する．

$$\text{全体座屈に対して, } v_0 = \frac{l}{1000} \sin \frac{\pi x}{l} \quad (2.11)$$

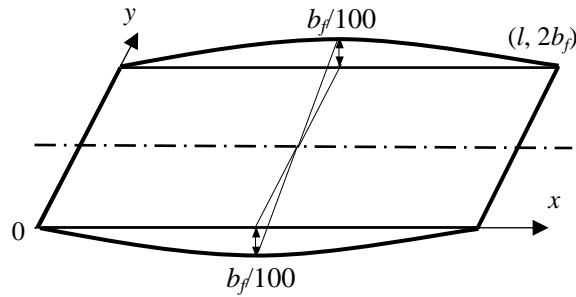
$$\text{局部座屈に対して, } w_0 = \frac{b}{100} \frac{y-b}{b} \sin \left(\frac{\pi x}{l} \right) \quad (2.12)$$

ここに、 v_0 : 平板部材の面内方向の初期たわみ
 w_0 : 平板部材の面外方向の初期たわみ
 l : 平板部材の長さ
 b : 平板部材の半幅

式(2.11)の最大初期たわみ $l/1000$ は，アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針(案)⁴⁾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り，式(2.12)の最大初期たわみ $b/100$ は，同指針で規定される，フランジの直角度に関して許容される最大の初期たわみである．



(a) 面内方向



(b) 面外方向

図 2.5 平板部材の初期たわみ

2.5 圧縮を受ける平板部材に対する連成座屈強度の評価式と解析値の比較

式(2.8)より, $\sigma_{iu}/\sigma_{0.2}$ の所定の値に対して R を求め, 得られた R の値を次式に代入して平板部材の板厚を決める.

$$t_f = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2) \sigma_{0.2} b_f}{0.425 E R}} \quad (2.13)$$

ここで, 平板部材の半幅 b_f を 100mm とし, $\mu = 0.3$, $E = 70$ GPa とする. 表 2.3 に示す $\sigma_{0.2}$ の値を式(2.13)の $\sigma_{0.2}$ に用いる.

次式により, λ_f の所定の値に対して平板部材の長さを決める.

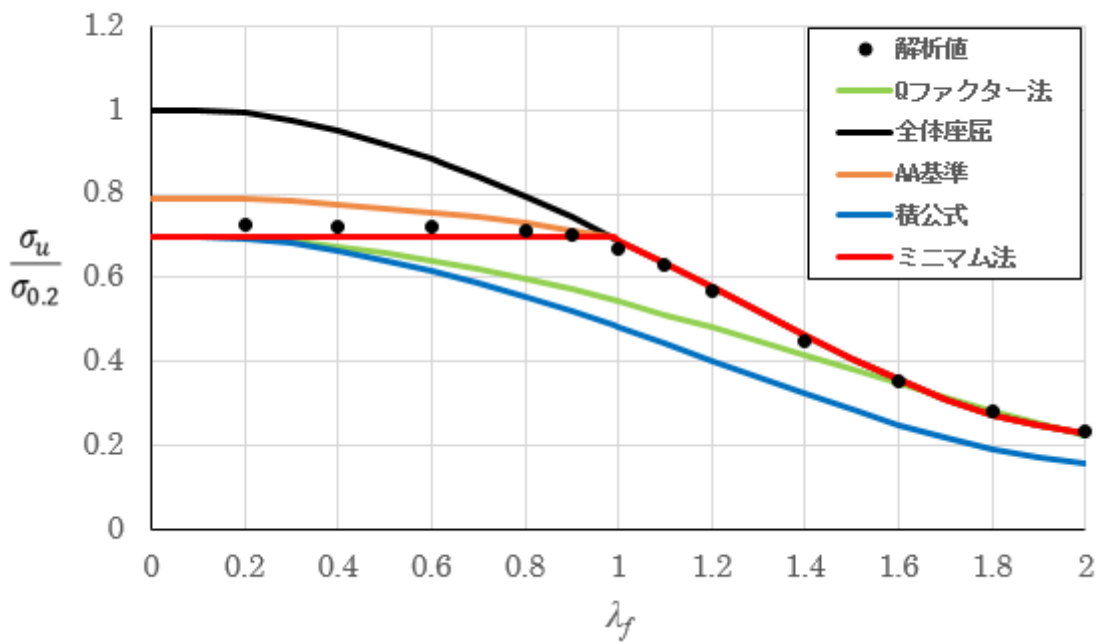
$$l = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \sqrt{\frac{E}{\sigma_{0.2}}} B_f \lambda_f \quad (2.14)$$

A6061-T6 の場合, $\sigma_{iu}/\sigma_{0.2} = 0.86, 0.71, 0.70, 0.69, 0.68, 0.645, 0.64$ の 7 ケースに対して, A5083-O の場合, $\sigma_{iu}/\sigma_{0.2} = 0.71, 0.65, 0.64, 0.63, 0.626, 0.61, 0.6$ の 7 ケースに対して, 圧縮を受ける平板部材に対する連成座屈強度の評価式と解析値の比較を付録 A に示す. さらに, 付録 A の各図の数値データを付録 B に示す. 代表的な図を A6061-T6 と A5083-O に対し

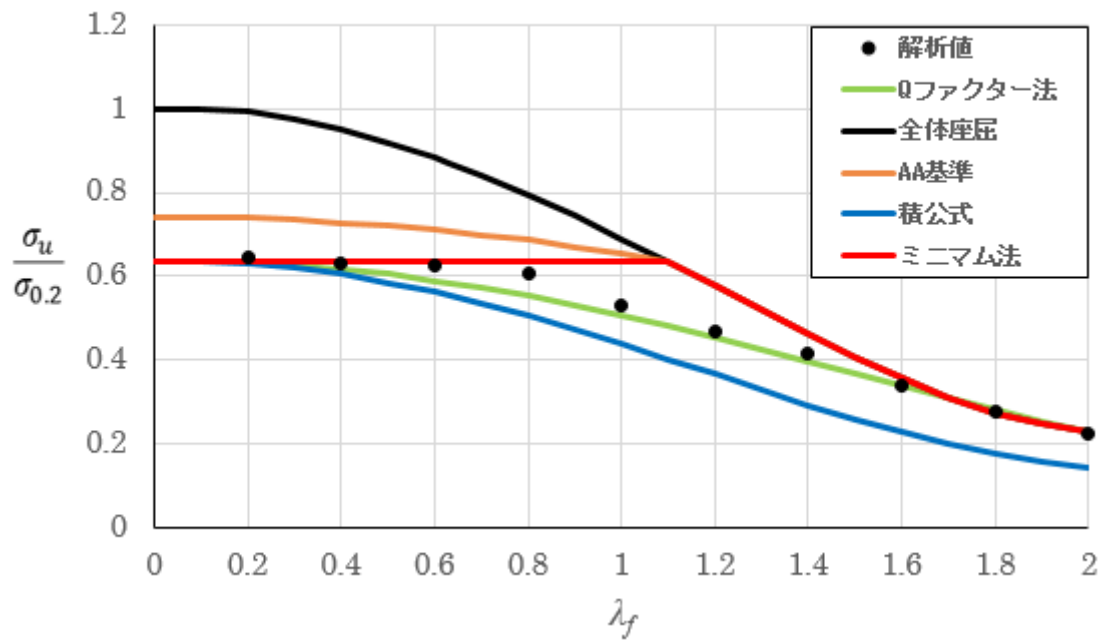
て、それぞれ図 2.6, 2.7 に示す。解析値の σ_u は、FEM 解析において、荷重が増加しなくなったとき、対称条件が与えられている辺 DF に生じる x 軸方向反力を断面積で除して得られる値である。

A6061-T6 の場合、解析値は、 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ が 0.70 以上で、ミニマム法が与える評価式に最も近く [図 2.6(a), 図 A.1 参照]、 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ が 0.70 から低下するに従って、Q ファクター方が与える評価式に近づく [図 2.6(b), 図 A.1 参照]。他方、A5083-O の場合、解析値は、 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ が 0.63 以上で、ミニマム法が与える評価式に最も近く [図 2.7(a), 図 A.2 参照]、 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ が 0.63 から低下するに従って、Q ファクター方が与える評価式に近づく [図 2.7(b), 図 A.2 参照]。

A6061-T6 の場合、 $\sigma_u/\sigma_{0.2}=0.70$ のとき、 $\lambda_f=0.2$ と 1.8 に対する終局時の平板部材の変形、および A5083-O の場合、 $\sigma_u/\sigma_{0.2}=0.63$ のとき、 $\lambda_f=0.2$ と 1.8 に対する終局時の平板部材の変形を、それぞれ図 2.8, 2.9 に示す。各図から分かるように、 $\lambda_f=0.2$ のとき、平板部材は面外方向に変形し、 $\lambda_f=1.8$ のとき、平板部材は水平方向に変形している。

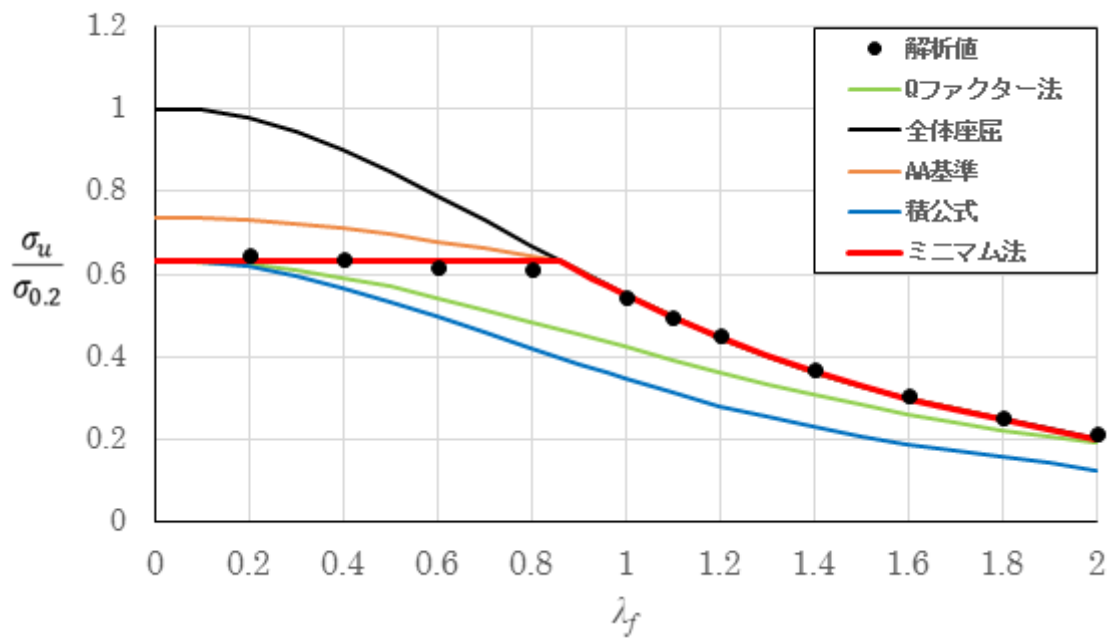


(a) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.70$

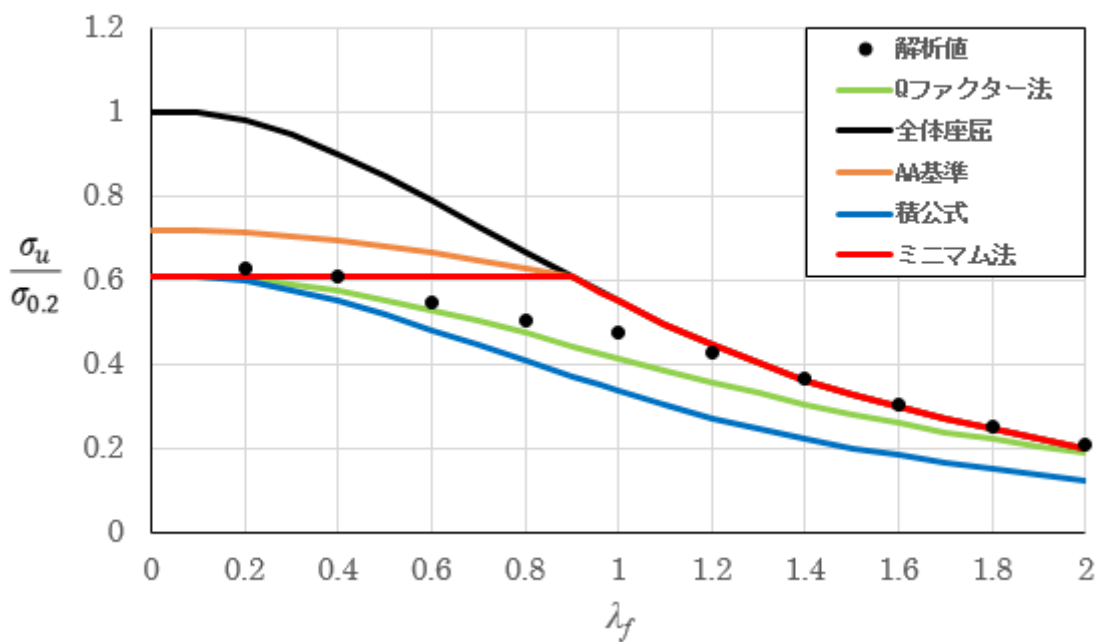


(b) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.64$

図 2.6 圧縮を受ける平板部材に対する連成座屈強度の評価式と解析値の比較 (A6061-T6)

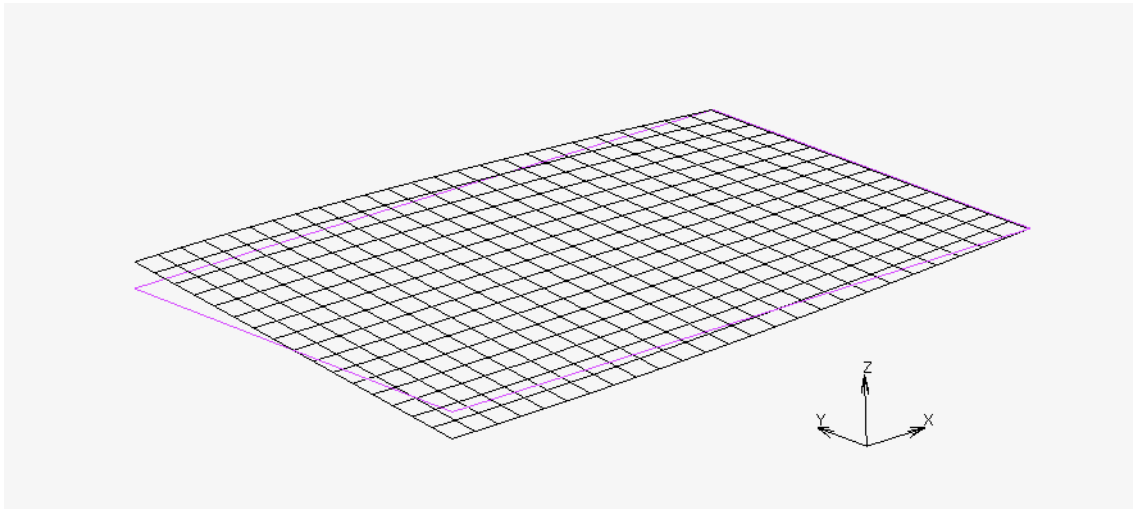


(a) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.63$

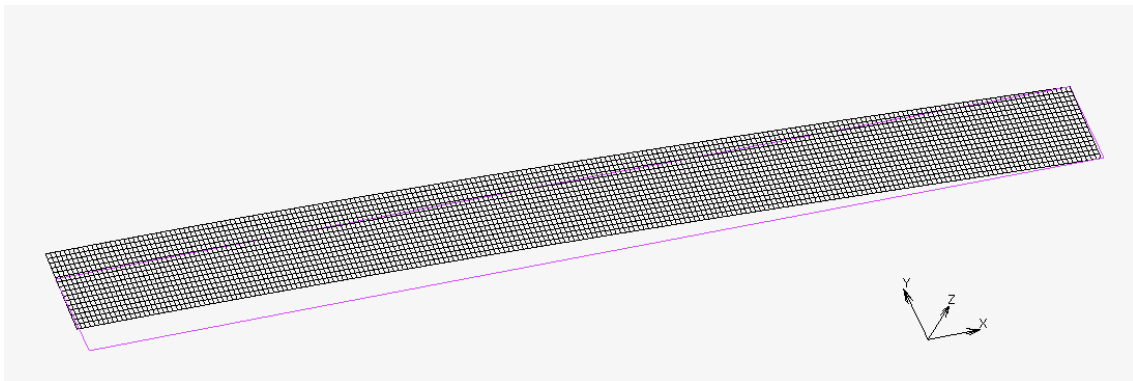


(b) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.61$

図 2.7 圧縮を受ける平板部材に対する連成座屈強度の評価式と解析値の比較 (A5083-O)

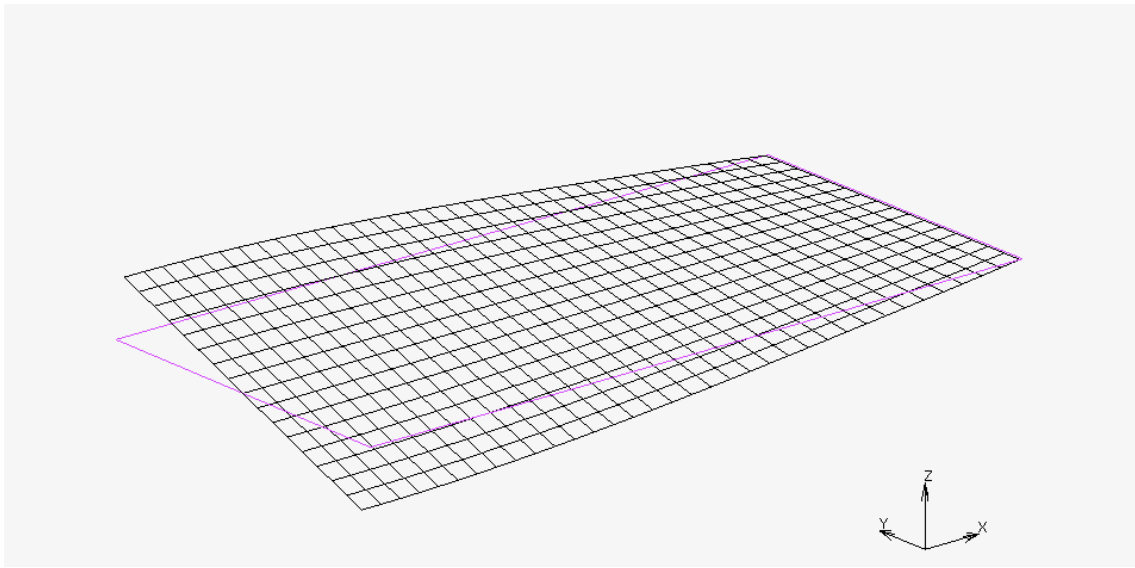


(a) $\lambda_f = 0.2$

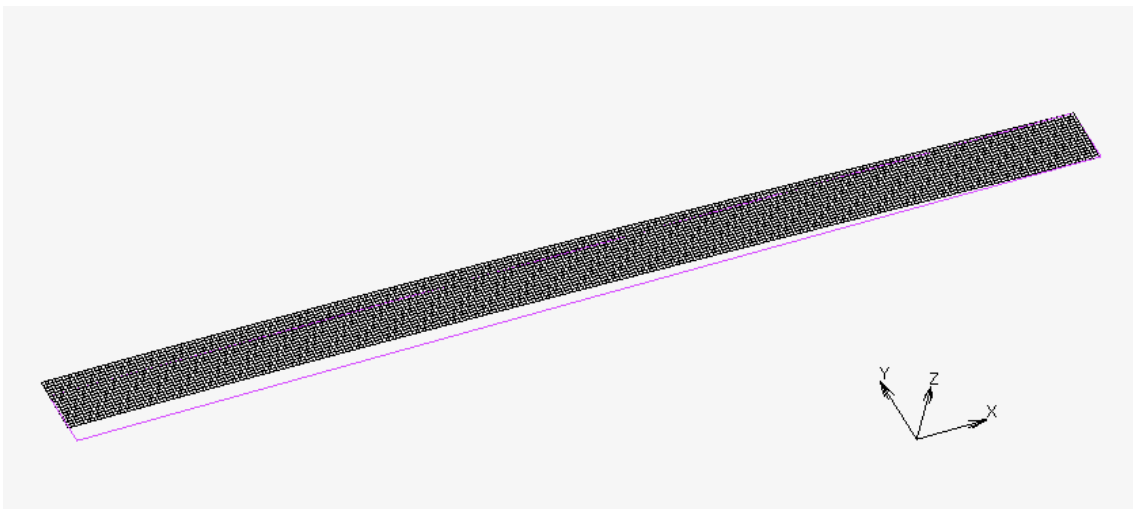


(b) $\lambda_f = 1.8$

図 2.8 終局時の平板部材の変形 (A6061-T6, $\sigma_{11} / \sigma_{0.2} = 0.70$)



(a) $\lambda_f = 0.2$



(b) $\lambda_f = 1.8$

図 2.9 終局時の平板部材の変形 (A5083-O, $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.63$)

第3章 曲げを受ける桁の圧縮フランジの連成座屈強度

3.1 曲げを受ける桁の耐荷力

圧縮フランジが局部座屈を起こさない場合に対する、曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力が次式で与えられている^{5),6)}。

$$\frac{M_u}{M_Y} = \frac{\sigma_{fgu}}{\sigma_{0.2}} g_w \quad (3.1)$$

$$\text{ここに, } M_Y = \sigma_{0.2} \frac{\frac{t_w b_w^3}{12} + 2 \left\{ \frac{B_f t_f^3}{12} + t_f B_f \left(\frac{b_w + t_f}{2} \right)^2 \right\}}{\frac{b_w + 2t_f}{2}} \quad (3.2)$$

$$g_w = \begin{cases} \frac{1 + \frac{A_w}{4A_f}}{1 + \frac{A_w}{6A_f}} & \left(\frac{b_w}{t_w} \leq \beta_0 \right) \\ 1 - \frac{\frac{A_w}{A_f} \frac{b_w - \beta_1}{t_w}}{12 \left(1 + \frac{A_w}{6A_f} \right) \beta_1 - \beta_0} & \left(\beta_0 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq \beta_2 \right) \\ \frac{1 + \frac{2A_w}{15A_f} \left(\beta_2 \frac{t_w}{b_w} \right)^p}{1 + \frac{A_w}{6A_f}} & \left(\beta_2 \leq \frac{b_w}{t_w} < \beta_3 \right) \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\frac{\sigma_{fgu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda_f \leq \lambda_1) \\ a_0 + a_1 \lambda_f + a_2 \lambda_f^2 + a_3 \lambda_f^3 + a_4 \lambda_f^4 & (\lambda_1 \leq \lambda_f \leq 2) \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\lambda_f = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} K \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{B_f} \quad (3.5)$$

$$K = \begin{cases} 1 & \left(\frac{A_w}{A_f} \leq 1 \right) \\ k_0 + k_1 \frac{A_w}{A_f} & \left(1 \leq \frac{A_w}{A_f} \leq 4 \right) \end{cases} \quad (3.6)$$

ここで、図 3.1 を参照して、これらの式の変数の意味は次の通りである。

- M_u : 桁の終局曲げモーメント
- M_Y : 桁の降伏曲げモーメント
- $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力
- g_w : 曲げを受けるウェブの耐荷力
- σ_{fgu} : 圧縮を受けるフランジが局部座屈を起こさない場合に対する水平耐荷力
- A_w : ウェブの断面積
- A_f : フランジの断面積
- b_w : ウェブの幅
- t_w : ウェブの板厚
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, p$: 表 3.1 に示す値の定数
- λ_f : 圧縮フランジに関する細長比パラメータ
- $\lambda_1, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$: 表 3.2 に示す値の定数
- l : 圧縮フランジの固定点間距離
- B_f : フランジの全幅
- E : ヤング係数
- K : 係数
- k_0, k_1 : 表 3.3 に示す値の定数值

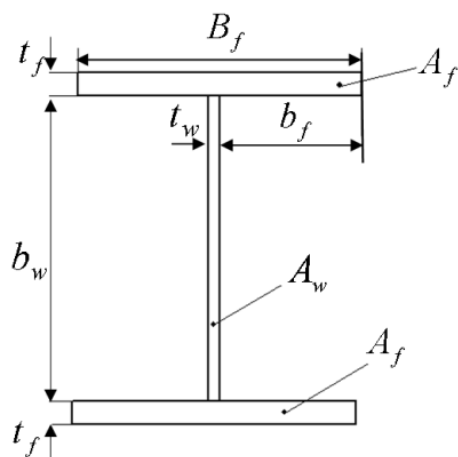


図 3.1 I 型桁の断面

表 3.1 $\sigma_{0.2}, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, p$ の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	β_0	β_1	β_2	β_3	p
A6061-T6	245	26.7	73.8	92.6	157.1	0.69
A5083-O	125	29.4	89.5	113.5	218.2	0.67

表 3.2 $\sigma_{0.2}$, λ_1 , a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 の値

アルミニウム合金		$\sigma_{0.2}$ (MPa)	λ_1	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
A6061-T6	非接合桁 増厚接合桁	245	0.13	1.01	-0.03	-0.30	-0.04	0.05
A5083-O	非接合桁	125	0.09	1.00	0.10	-1.13	0.72	-0.14
	接合桁		0.09	1.00	0.10	-1.33	0.88	-0.17

表 3.3 k_0 と k_1 の値

アルミニウム合金	k_0	k_1
A6061-T6	0.87	0.13
A5083-O	0.91	0.09

3.2 FEM による曲げを受ける桁の弾塑性有限変位解析

曲げを受ける I 型断面の桁の弾塑性有限変位解析を MARC¹²⁾を用いて行う。式(2.10)で与えられる応力-ひずみ関係を使用する。

境界条件を表 3.4 に示す。同表の挿入図を参照して、中点 M と N を中心として、ウェブの辺 BH および辺 EK を z 軸回りに強制回転させることにより桁に曲げ荷重を与える。ただし、中点 M と N の x 軸方向の変位は拘束しない。これを実現させるために、辺 BH, 辺 AC, 辺 GI, 辺 EK, 辺 DF, 辺 JL に剛棒を取り付け、ウェブとフランジの板要素の節点と剛棒の節点を共有させる。有限要素として、板に対して 8 節点シェル要素 (MARC における要素番号 22), 剛棒に対して 3 次元弾性梁要素 (MARC における要素番号 52) を使用する。さらに、中点 M と辺 BH 上の各節点および中点 N と辺 EK 上の各節点の z 軸回りの回転をタイイングし、中点 M と辺 BH 上の各節点および中点 N と辺 EK 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 3.4 の挿入図に示すように、ウェブの要素分割は、高さ方向に 16 等分割し、1 要素の x 軸方向の長さに対する y 軸方向の長さが 0.9 から 1.1 の範囲になるようにする。フランジの要素分割は、全幅を 16 等分割する。

表 3.4 境界条件

	変位			回転角	
	x 方向	y 方向	z 方向	y 軸回り	z 軸回り
点 M	—	—	—	—	強制回転
点 N	—	—	—	—	強制回転
辺 GI	拘束	拘束	拘束	—	—
辺 JL	—	拘束	拘束	—	—

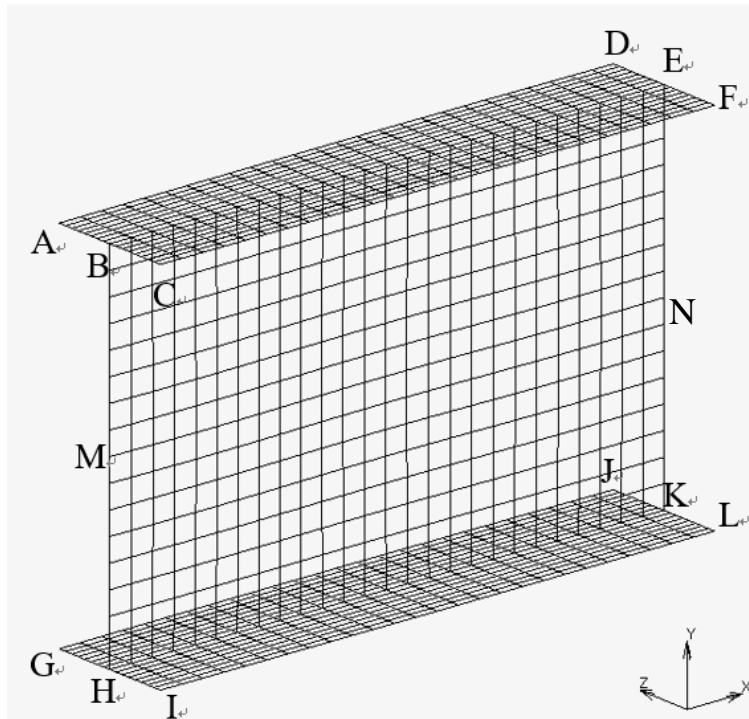


図 3.2 を参照して、上下フランジの水平方向に対して、次式で与えられる初期たわみを仮定する。

$$w_0 = \frac{l}{1000} \sin \frac{\pi x}{l} \quad (3.7)$$

さらに、上フランジの面外方向に対して、次式で与えられる初期たわみを仮定する。

$$v_0 = \frac{b_f}{100} \frac{y - b_f}{b_f} \sin \left(\frac{\pi x}{l} \right) \quad (3.8)$$

式(3.7)の $l/1000$ は、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）⁴⁾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り、式(3.8)の $b_f/100$ は、同指針で規定されるフランジの直角度に関して許容される最大の初期たわみである。

他方、ウェブに対して、次式で与えられる初期たわみを仮定する。

$$w_0 = \frac{b_w}{250} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_w + t_f}\right) + \frac{l}{1000} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (3.9)$$

ここに、 $a = l/m$ (m は整数)

式(3.9)の $b_w/250$ は、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針(案)⁴⁾で規定される、桁ウェブに許容される最大初期たわみである。面内曲げを受ける長方形板の耐荷力が最も低くなる縦横比を考慮して¹³⁾、半波長 a は、 $0.4b_w$ から $0.6b_w$ の範囲になるように設定する。

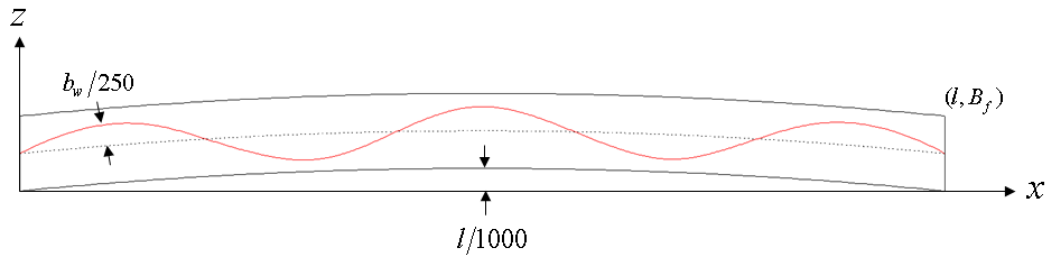


図 3.2 フランジとウェブの初期たわみ

3.3 圧縮フランジに対する連成座屈強度の評価式と解析値の比較

圧縮フランジの局部座屈に対する耐荷力を σ_{flu} で表すと、 σ_{flu} は式(2.8)の σ_{lu} で与えられる。式(2.8)より、 $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2}$ の所定の値に対して R を求め、得られた R の値を次式に代入して、片側の圧縮フランジの幅厚比が次式で与えられる。

$$\frac{b_f}{t_f} = \pi \sqrt{\frac{0.425}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} R \quad (3.10)$$

b_w/t_w の任意の値を満たす b_w と t_w の値を決め、次式によりフランジの長さを決める。

$$l = \frac{\pi}{2\sqrt{3K}} \sqrt{\frac{E}{\sigma_{0.2}}} (2b_f + t_w) \lambda_f \quad (3.11)$$

式(3.11)は式(3.5)から与えられる。

式(3.3)の g_w および式(3.6)の K に含まれるウェブとフランジの断面積比 A_w/A_f は次式で計算される。

$$\frac{A_w}{A_f} = \frac{b_w t_w}{(2b_f + t_w) t_f} \quad (3.12)$$

解析対象の桁の断面寸法を表 3.5 に示す。前章で示したように、圧縮を受ける平板部材の連成座屈強度の評価式としてミニマム法が適用できる $\sigma_{lu}/\sigma_{0.2}$ の限界値は、A6061-T6 と A5083-O に対して、それぞれ 0.70 と 0.63 であった。これらの値に対して、桁の片側のフランジの幅厚比を設定している。

表 3.5 解析対象の桁の断面寸法

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{lu}/\sigma_{0.2}$	R	b_f (mm)	t_f (mm)	b_w/t_w	b_w (mm)	t_w (mm)	A_w/A_f	g_w
A6061-T6	245	0.70	0.192	62.5	5	73.8	369	5	2.838	1
A5083-O	125	0.63	0.192	73.0	4.2	89.5	358	4	2.273	1

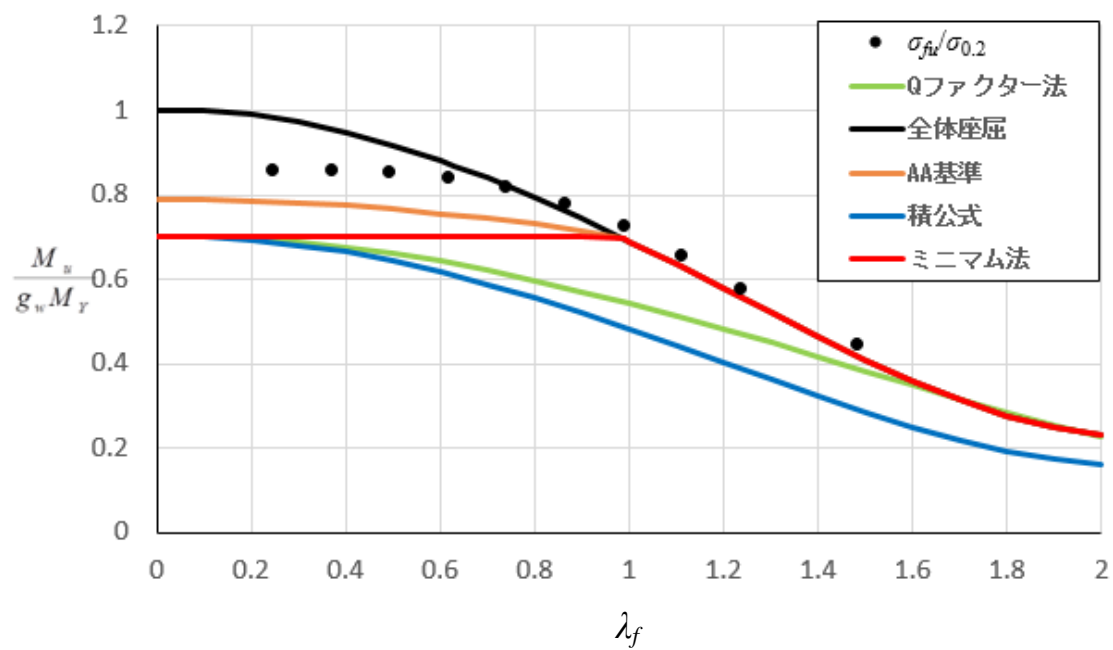
式(3.1)は次式に変形できる.

$$\frac{M_u}{g_w M_Y} = \frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} \quad (3.13)$$

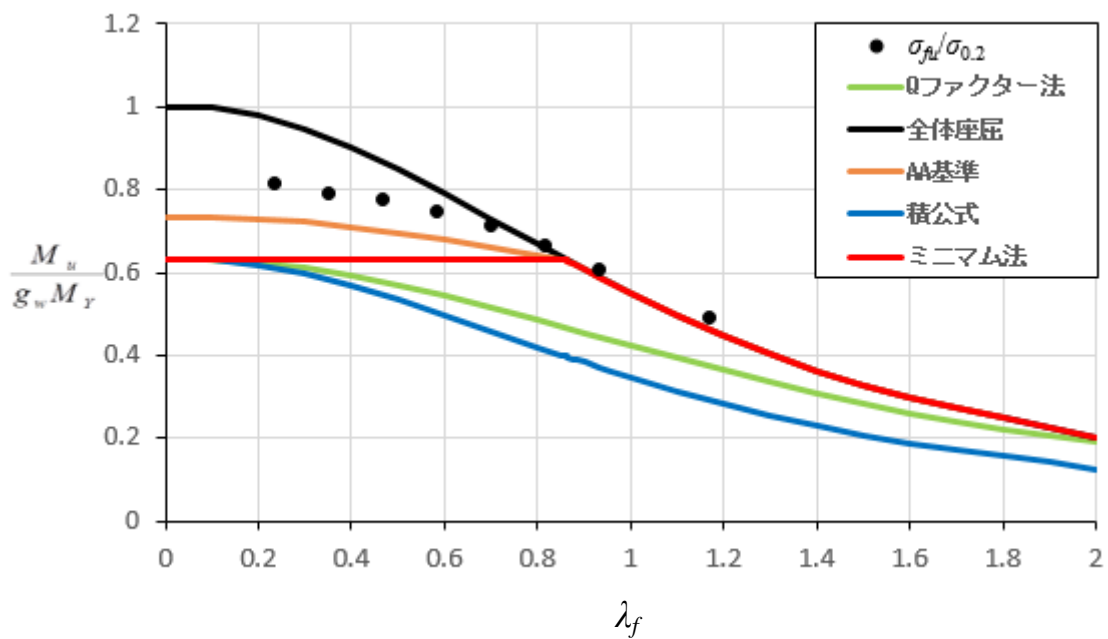
σ_{fu} は、局部座屈の影響を考慮した圧縮フランジの水平耐荷力である。圧縮フランジの全体座屈に対する耐荷力 σ_{fgu} は式(3.4)で与えられ、圧縮フランジの局部座屈に対する耐荷力 σ_{flu} は、 $\sigma_{lu} = \sigma_{flu}$ として式(2.8)で与えられる。A5083-O に対する σ_{fgu} に対して、表 3.2 の非接合桁に対する数値を式(3.4)に用いる。

曲げを受ける桁の圧縮フランジに対する連成座屈強度の評価式と解析値の比較を図 3.3 に示す。解析値の M_u は、FEM 解析において、桁に強制回転を与えた節点の、荷重が増加しなくなったときの反力曲げモーメントの値である。解析値の数値データを付録 C に示す。図から分かるように、A6061-T6 と A5083-O の各場合、 $\sigma_{fgu} \geq \sigma_{flu}$ のとき、解析値は、 σ_{fgu} と AA 基準による σ_{fu} の間にある。図 2.6(a) と 2.7(a) に示したように、圧縮を受ける平板部材では、 $\sigma_{fgu} \geq \sigma_{flu}$ のとき、解析値は σ_{flu} であった。圧縮フランジはウェブによってある程度の回転拘束を受ける。このウェブによる回転拘束によって圧縮フランジの σ_{flu} が上昇することが、 $\sigma_{fgu} \geq \sigma_{flu}$ のとき、解析値が σ_{fgu} と σ_{flu} の間に存在する一因と考えられる。 $\sigma_{fgu} < \sigma_{flu}$ では、解析値は σ_{fgu} である。

A6061-T6 の場合、 $\lambda_f = 0.248$ と 1.487 に対する終局時の桁の変形、および A5083-O の場合、 $\lambda_f = 0.233$ と 1.167 に対する終局時の桁の変形を、それぞれ図 3.4、3.5 に示す。各図から分かるように、A6061-T6 の場合 $\lambda_f = 0.248$ および A5083-O の場合 $\lambda_f = 0.233$ のとき、圧縮フランジは面外方向に変形し、A6061-T6 の場合 $\lambda_f = 1.487$ および A5083-O の場合 $\lambda_f = 1.167$ のとき、圧縮フランジは水平方向に変形している。

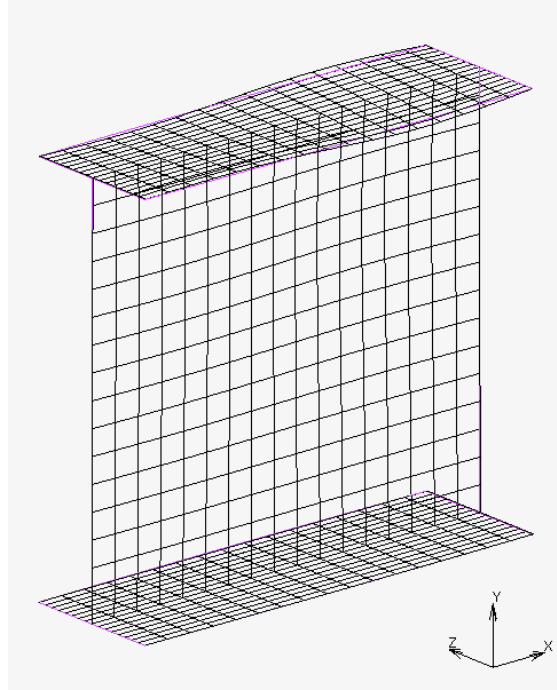


(a) A6061-T6

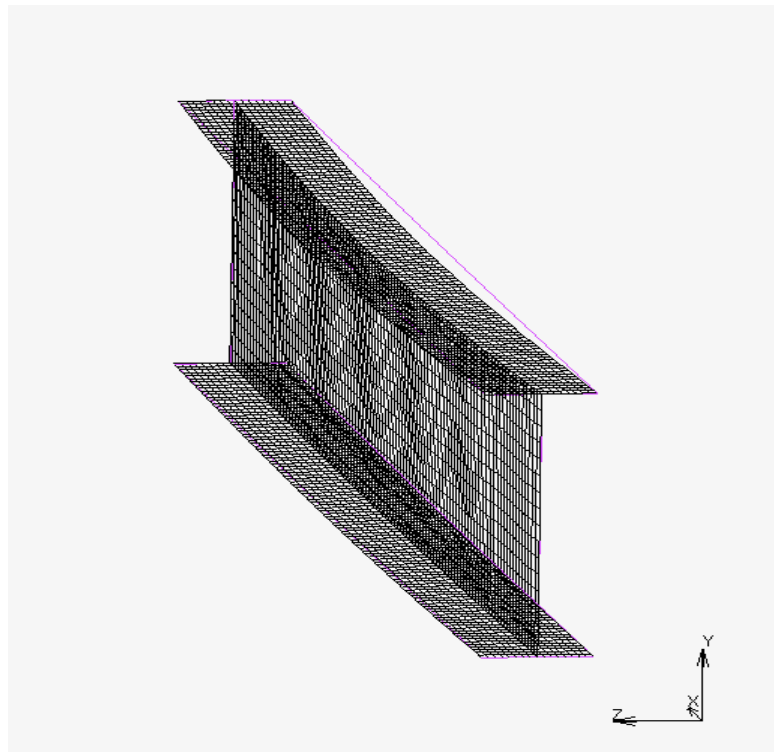


(b) A5083-O

図 3.3 圧縮フランジに対する連成座屈強度の評価式と解析値の比較

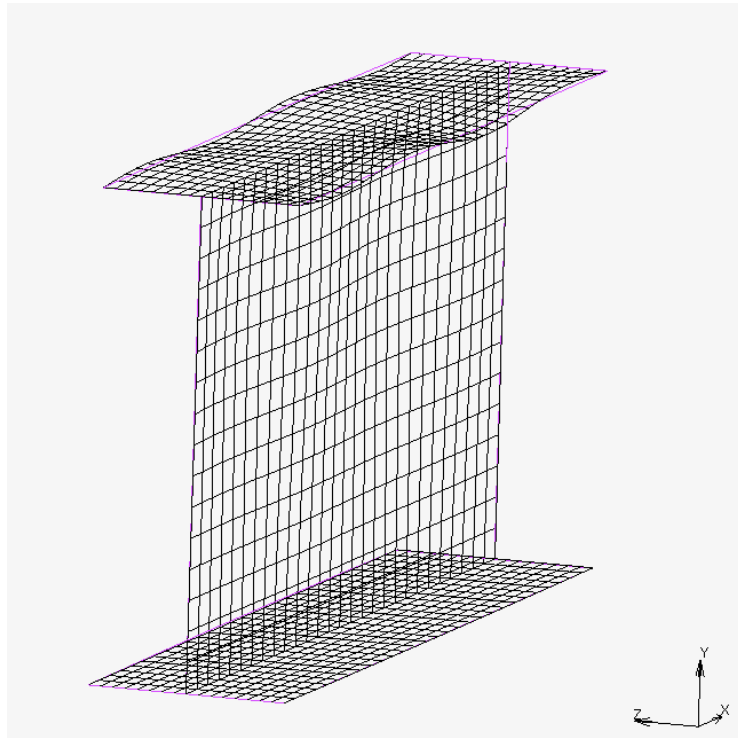


(a) $\lambda_f=0.248$

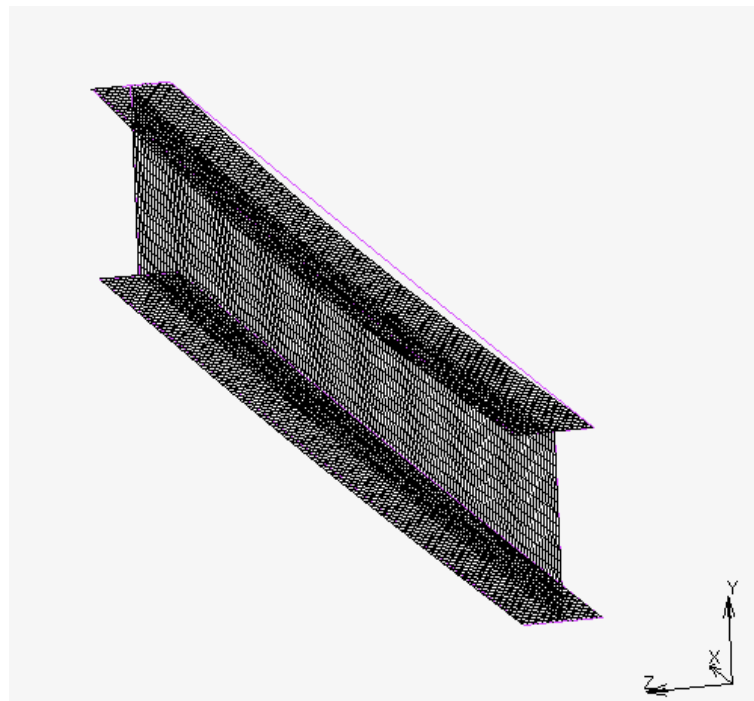


(b) $\lambda_f=1.487$

図 3.4 終局時の桁の変形 (A6061-T6)



(a) $\lambda_f=0.233$



(b) $\lambda_f=1.167$

図 3.5 終局時の桁の変形 (A5083-O)

3.4 曲げを受ける桁の横倒れ耐荷力

前節の検討結果から、圧縮フランジの局部座屈の影響を考慮した、曲げを受ける桁の横倒れ耐荷力は、ミニマム法による連成座屈強度の評価式で安全に評価することができる。すなわち、式(3.1)を次式に変更することによって曲げを受ける桁の横倒れ耐荷力が与えられる。

$$\frac{M_u}{M_y} = \frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} g_w \quad (3.14)$$

$$\text{ここに、} \sigma_{fu} = \min(\sigma_{fgu}, \sigma_{flu}) \quad (3.15)$$

式(3.15)の適用範囲は次の通りである。

$$\text{A6061-T6 に対して、} \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} \geq 0.70 \quad (3.16)$$

$$\text{A5083-O に対して、} \sigma_{flu}/\sigma_{0.2} \geq 0.63 \quad (3.17)$$

σ_{fgu} は式(3.4)で与えられ、 σ_{flu} は式(2.8)で与えられる。

式(3.16)と(3.17)で等号が成立するときの幅厚比パラメータ R の値は、式(2.8)より、ともに 1.1925 である。 $R=1.1925$ を式(3.10)に用いて、式(3.16)と(3.17)に代わる適用範囲として次式を得る。

$$\text{A6061-T6 に対して、} b_f/t_f \leq 12.5 \quad (3.18)$$

$$\text{A5083-O に対して、} b_f/t_f \leq 17.5 \quad (3.19)$$

第4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、フランジの局部座屈がアルミニウム合金桁の横倒れ耐荷力に及ぼす影響を明らかにした。最初に、平板部材が圧縮を受けて面内方向に水平座屈、面外方向に局部座屈する場合に対する連成座屈強度を解明した。次に、この連成座屈強度が曲げを受ける桁の横倒れ耐荷力の評価に適用できるか否かを調べた。主な結論は以下の通りである。

- (1) A6061-T6 の場合、 $\sigma_{lu}/\sigma_{0.2}$ が 0.70 以上で、ミニマム法による評価式が適用でき、 $\sigma_{lu}/\sigma_{0.2}$ が 0.70 から低下するに従って、Q ファクター方による評価式が適用できる。他方、A5083-O の場合、 $\sigma_{lu}/\sigma_{0.2}$ が 0.63 以上で、ミニマム法による評価式が適用でき、 $\sigma_{lu}/\sigma_{0.2}$ が 0.63 から低下するに従って、Q ファクター方による評価式が適用できる。
- (2) 圧縮フランジの局部座屈の影響を考慮した、曲げを受ける桁の横倒れ耐荷力は、ミニマム法による連成座屈強度の評価式で安全に評価することができる。曲げを受ける桁の横倒れ耐荷力は次式で与えられる。

$$\frac{M_u}{M_Y} = \frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} g_w$$

ここに、 $\sigma_{fu} = \min(\sigma_{fgu}, \sigma_{flu})$

σ_{fu} の適用範囲は次の通りである。

A6061-T6 に対して、 $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2} \geq 0.70$

A5083-O に対して、 $\sigma_{flu}/\sigma_{0.2} \geq 0.63$

上記適用範囲に代わるものとして、

A6061-T6 に対して、 $b_f/t_f \leq 12.5$

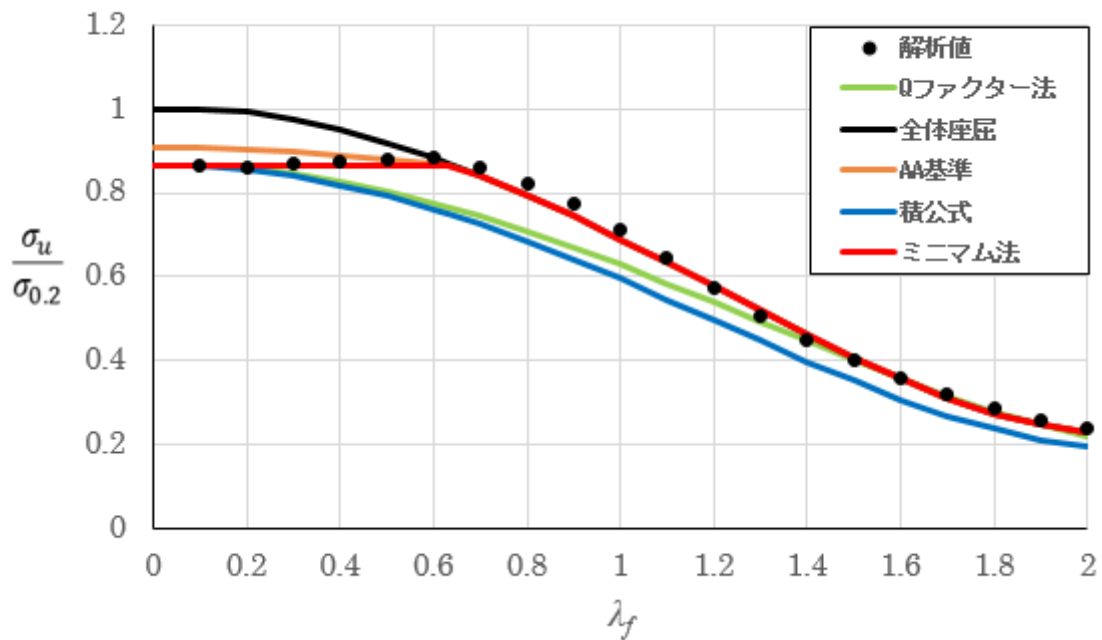
A5083-O に対して、 $b_f/t_f \leq 17.5$

σ_{fgu} は式(3.4)で与えられ、 σ_{flu} は、 $\sigma_{lu} = \sigma_{flu}$ として式(2.8)で与えられる。

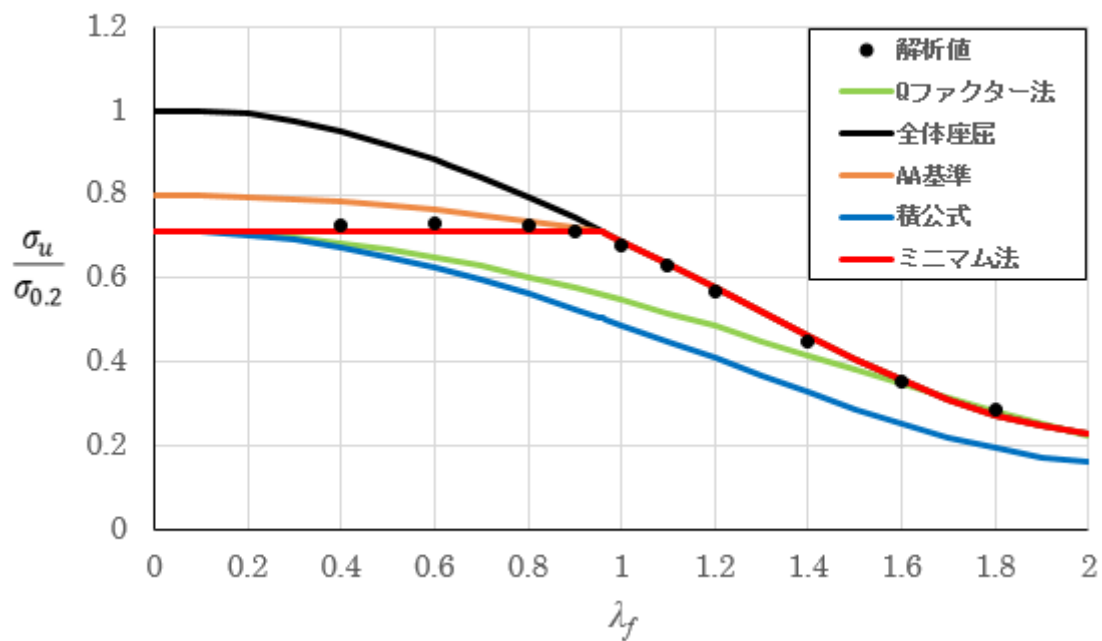
参考文献

- 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) 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.
- 5) 鳥畑一博，大倉一郎：曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力，構造工学論文集，Vol.62A，pp.93-101，2016.
- 6) 鳥畑一博，大倉一郎：曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力，ALST 研究レポート，No.42，2016.
- 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) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，2012.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) MSC.Software Corporation: Marc Mentat 2014.0.0.
- 13) 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.

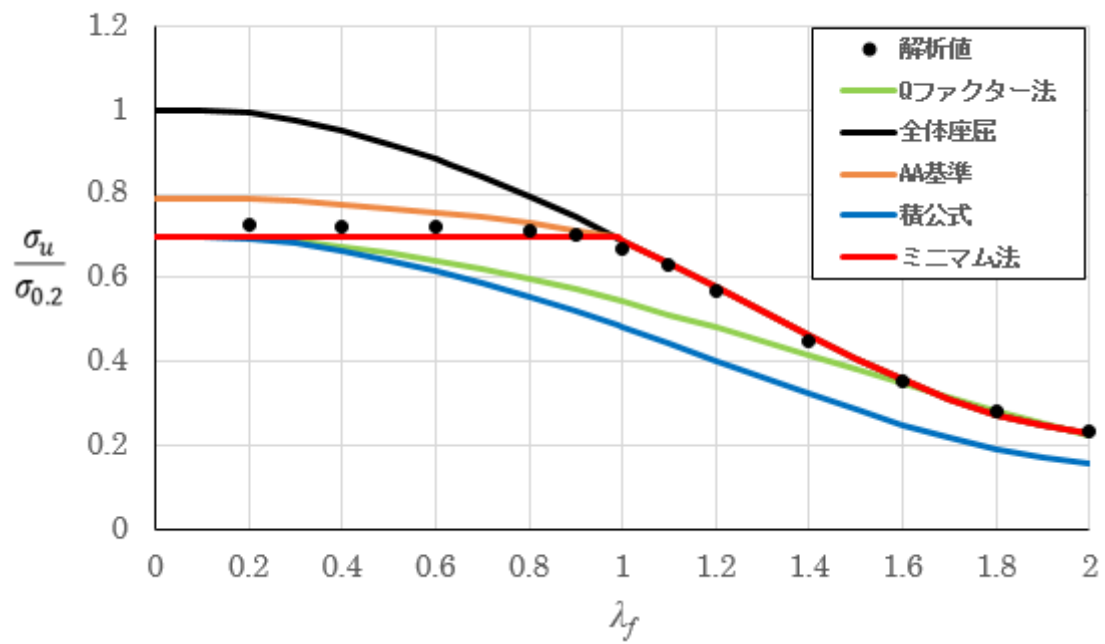
付録 A 圧縮を受ける平板部材に対する連成座屈強度の評価式
と解析値の比較



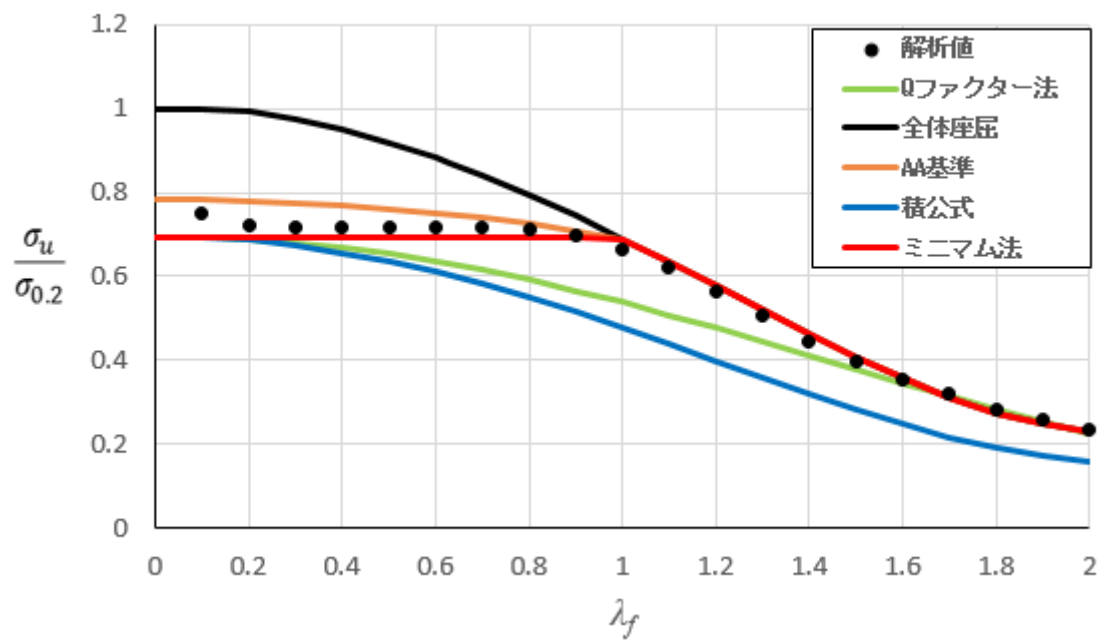
(a) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.86$



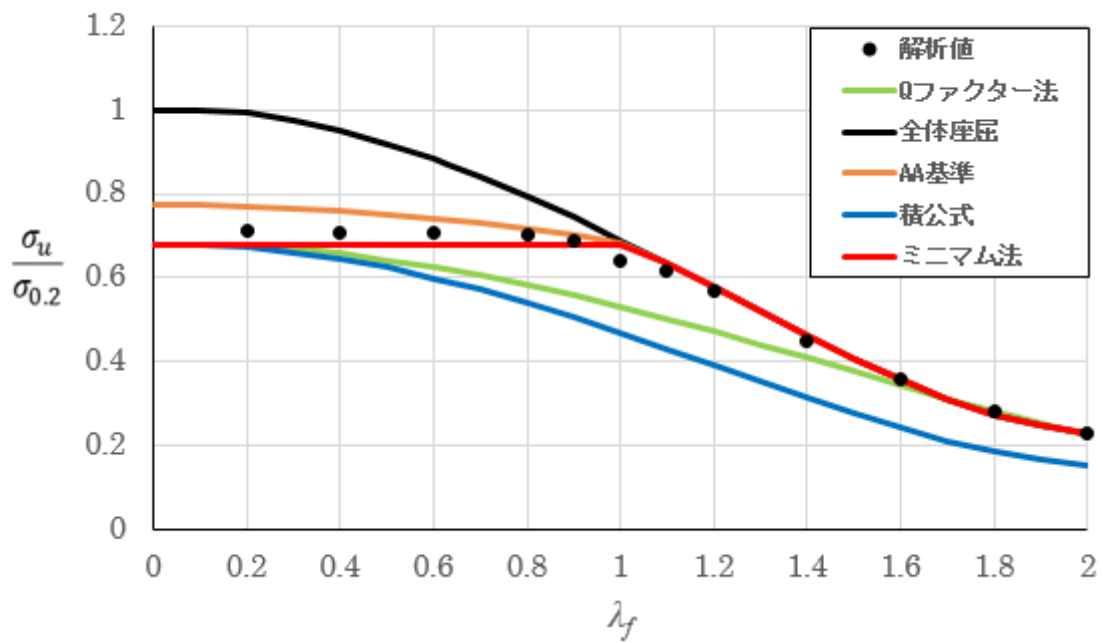
(b) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.71$



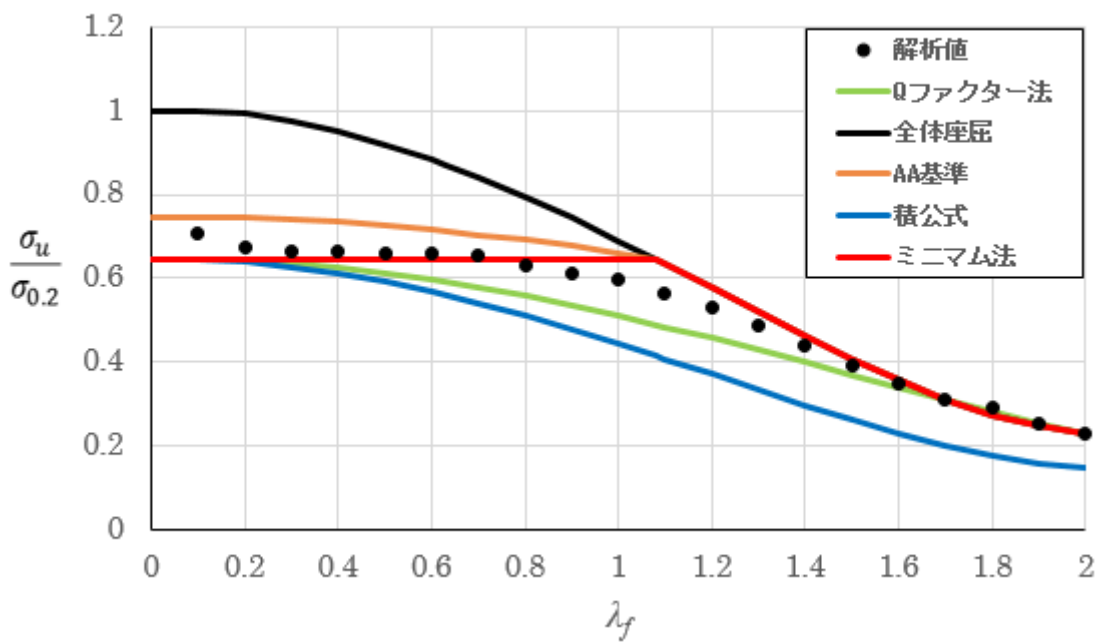
(c) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.70$



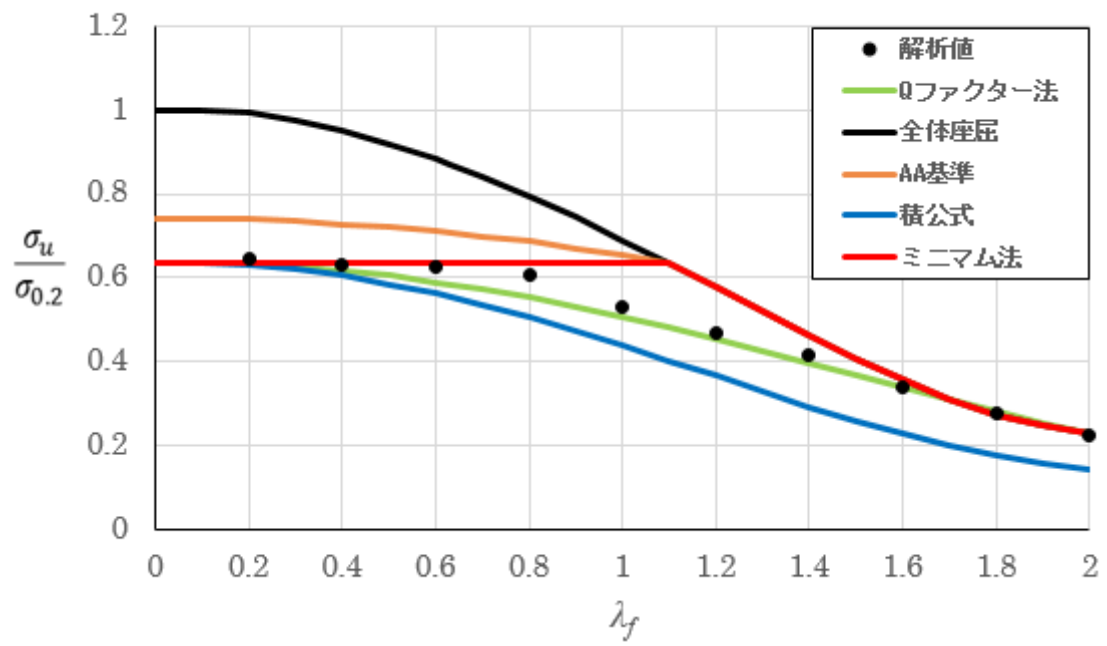
(d) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.69$



(e) $\sigma_{1u}/\sigma_{0.2} = 0.68$

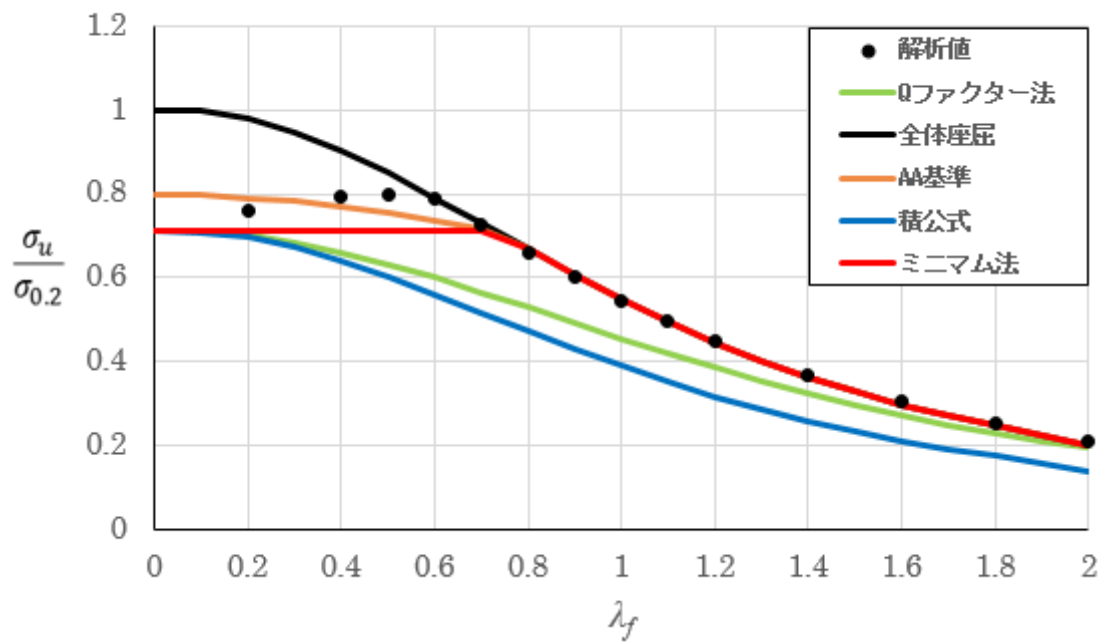


(f) $\sigma_{1u}/\sigma_{0.2} = 0.645$

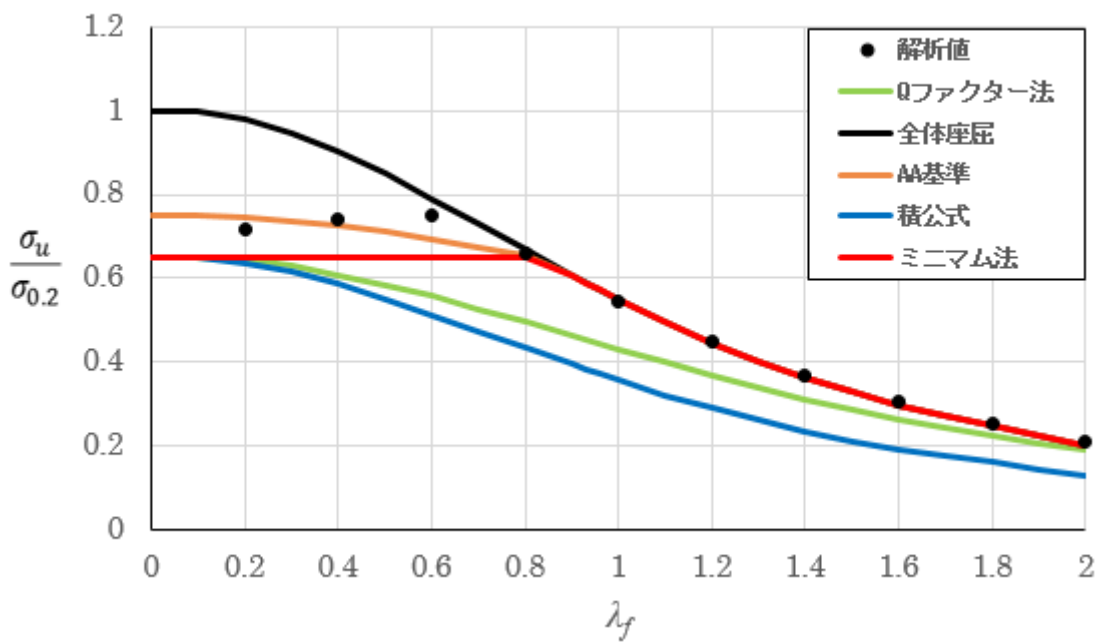


(g) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.64$

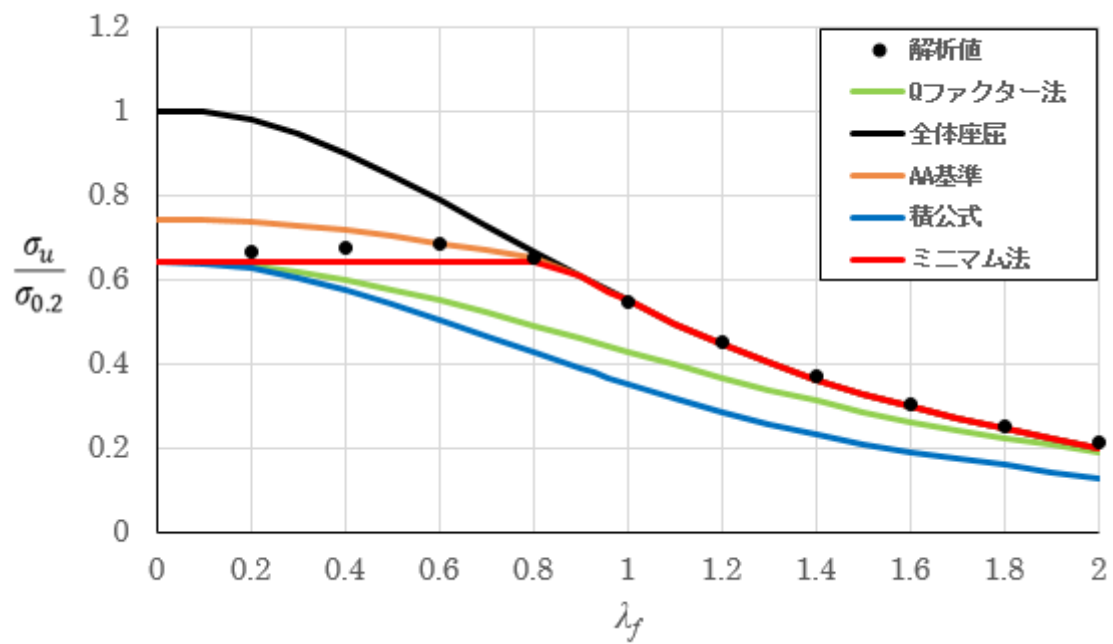
図 A.1 A6061-T6



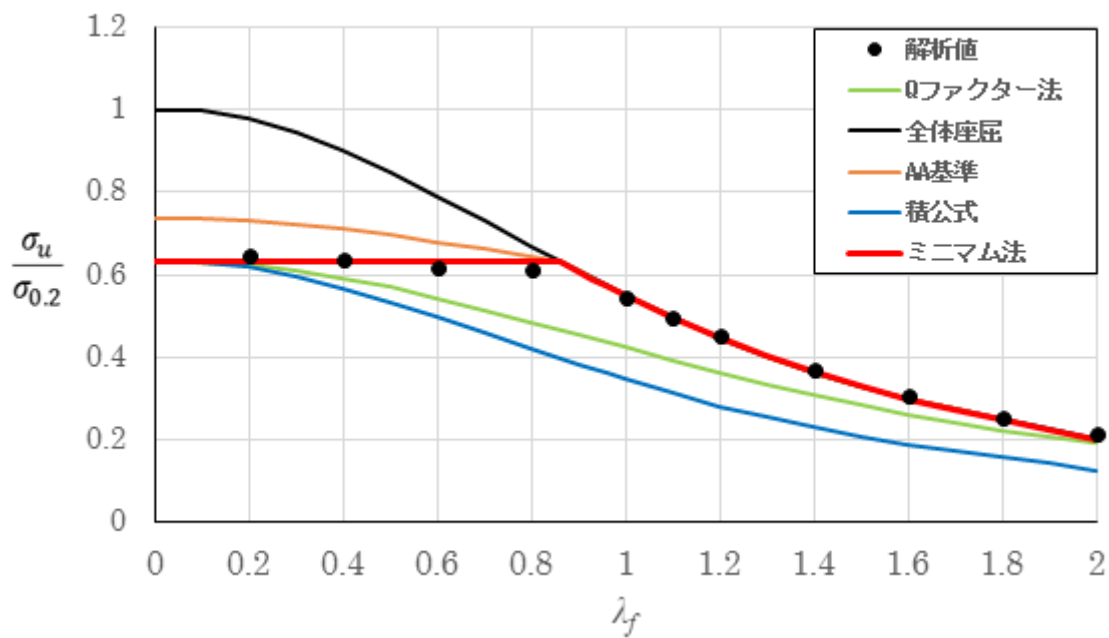
(a) $\sigma_{1u}/\sigma_{0.2} = 0.71$



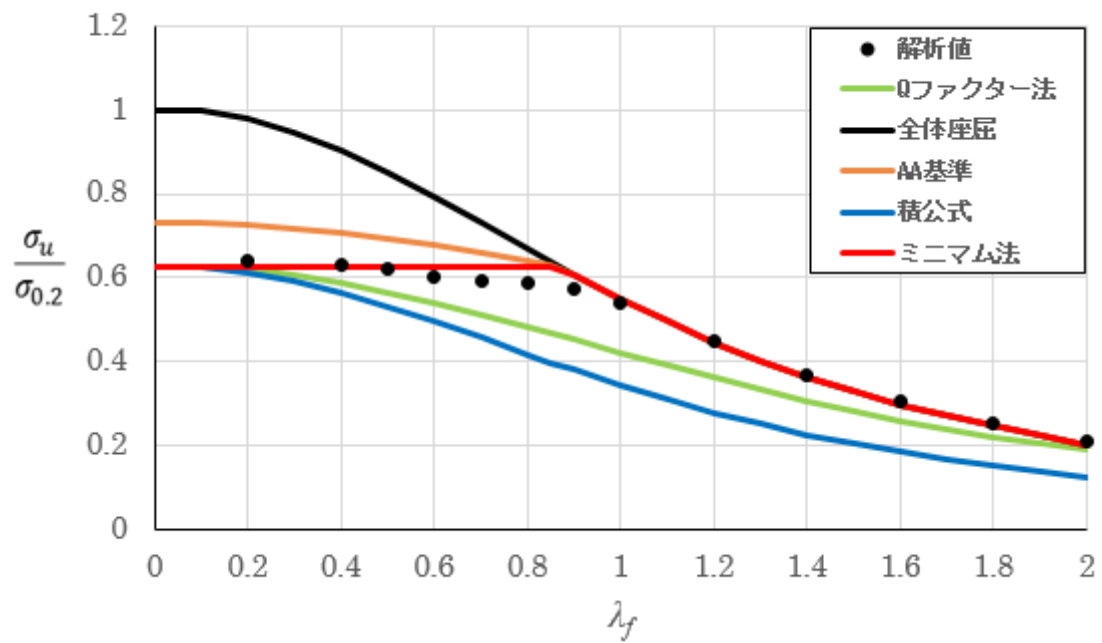
(b) $\sigma_{1u}/\sigma_{0.2} = 0.65$



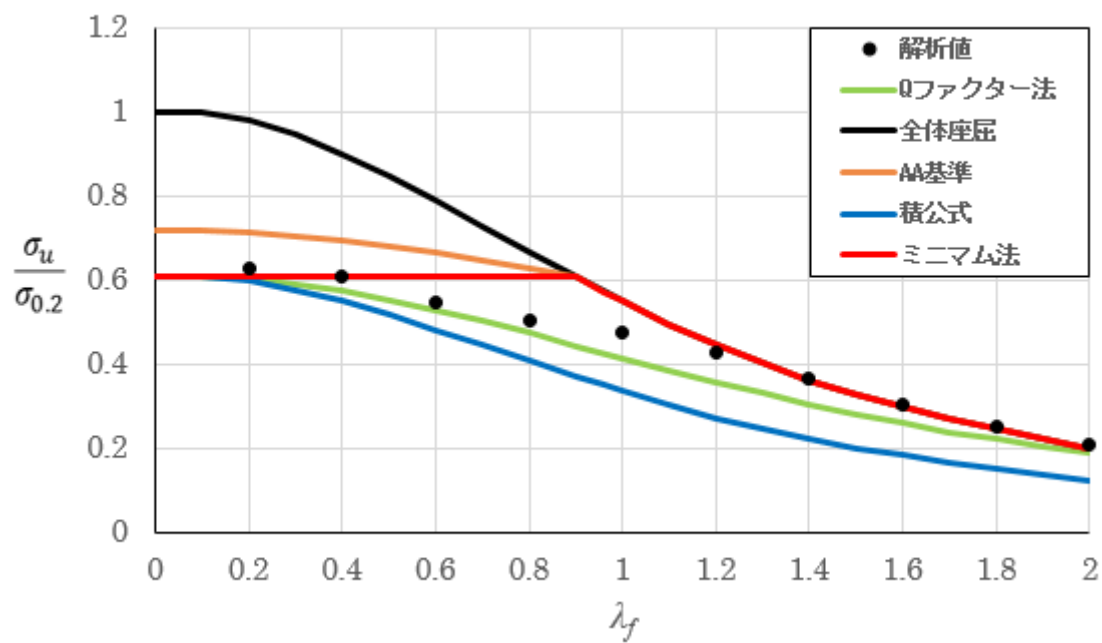
(c) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.64$



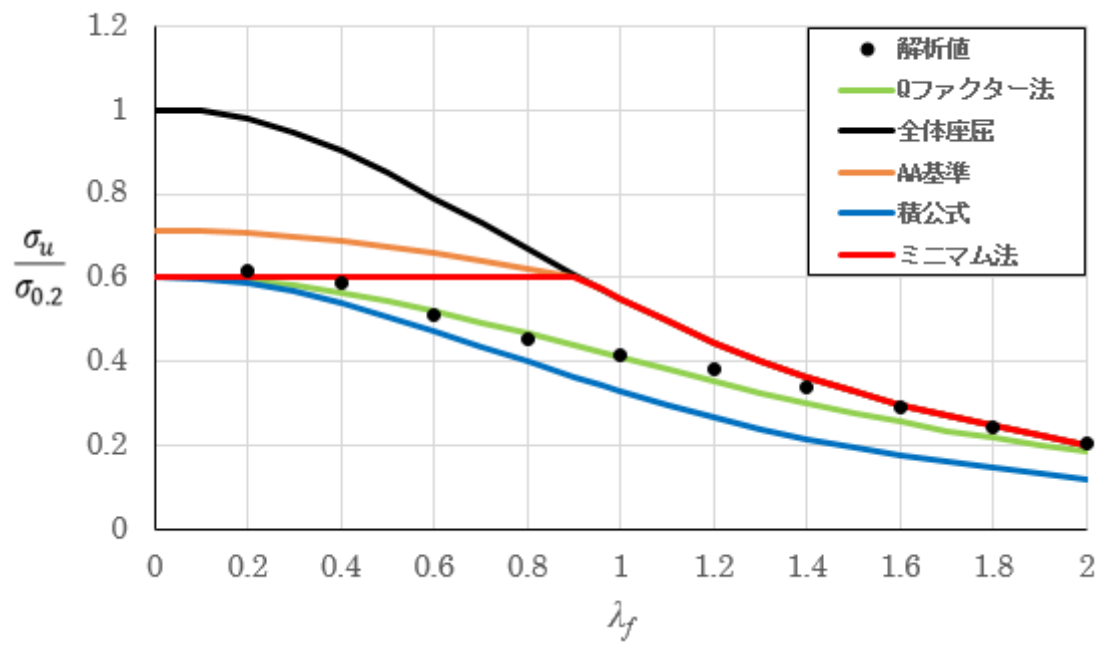
(d) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.63$



(e) $\sigma_{1u} / \sigma_{0.2} = 0.626$



(f) $\sigma_{1u} / \sigma_{0.2} = 0.61$



(g) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.6$

図 A.2 A5083-O

付録 B 数値データ

表 B.1 A6061-T6

(a) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.86$

λ	l	$\sigma_{lu} / \sigma_{0.2}$
0.1	306.588	0.864
0.2	613.176	0.860
0.3	919.764	0.868
0.4	1226.352	0.876
0.5	1532.940	0.880
0.6	1839.528	0.882
0.7	2146.116	0.858
0.8	2452.704	0.822
0.9	2759.292	0.774
1	3065.880	0.714
1.1	3372.469	0.644
1.2	3679.057	0.574
1.3	3985.645	0.508
1.4	4292.233	0.450
1.5	4598.821	0.400
1.6	4905.409	0.358
1.7	5211.997	0.321
1.8	5518.584	0.290
1.9	5825.173	0.259
2	6131.761	0.240

(b) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.71$

λ	l	$\sigma_{lu} / \sigma_{0.2}$
0.4	1226.352	0.727
0.6	1839.528	0.729
0.8	2452.704	0.725
0.9	2759.292	0.711
1	3065.88	0.677

1.1	3372.469	0.629
1.2	3679.057	0.571
1.4	4292.233	0.448
1.6	4905.409	0.355
1.8	5518.584	0.286

(c) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.70$

λ	l	$\sigma_{lu} / \sigma_{0.2}$
0.2	613.1761	0.724
0.4	1226.352	0.720
0.6	1839.528	0.722
0.8	2452.704	0.714
0.9	2759.292	0.703
1	3065.88	0.670
1.1	3372.469	0.633
1.2	3679.057	0.570
1.4	4292.233	0.448
1.6	4905.409	0.355
1.8	5518.584	0.285
2	6131.761	0.233

(d) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.69$

λ	l	$\sigma_{lu} / \sigma_{0.2}$
0.1	306.588	0.750
0.2	613.1761	0.720
0.3	919.7641	0.715
0.4	1226.352	0.716
0.5	1532.94	0.716
0.6	1839.528	0.715
0.7	2146.116	0.716
0.8	2452.704	0.712
0.9	2759.292	0.697
1	3065.88	0.666
1.1	3372.469	0.621

1.2	3679.057	0.566
1.3	3985.645	0.505
1.4	4292.233	0.447
1.5	4598.821	0.397
1.6	4905.409	0.354
1.7	5211.997	0.321
1.8	5518.584	0.285
1.9	5825.173	0.258
2	6131.761	0.233

(e) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.68$

λ	l	$\sigma_{lu} / \sigma_{0.2}$
0.2	613.1761	0.713
0.4	1226.352	0.708
0.6	1839.528	0.709
0.8	2452.704	0.703
0.9	2759.292	0.689
1	3065.88	0.642
1.1	3372.469	0.615
1.2	3679.057	0.570
1.4	4292.233	0.448
1.6	4905.409	0.358
1.8	5518.584	0.284
2	6131.761	0.233

(f) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.645$

λ	l	$\sigma_{lu} / \sigma_{0.2}$
0.1	306.588	0.707
0.2	613.1761	0.673
0.3	919.7641	0.664
0.4	1226.352	0.662
0.5	1532.94	0.661
0.6	1839.528	0.660
0.7	2146.116	0.655

0.8	2452.704	0.633
0.9	2759.292	0.613
1	3065.88	0.599
1.1	3372.469	0.563
1.2	3679.057	0.533
1.3	3985.645	0.490
1.4	4292.233	0.441
1.5	4598.821	0.390
1.6	4905.409	0.351
1.7	5211.997	0.312
1.8	5518.584	0.291
1.9	5825.173	0.253
2	6131.761	0.230

(g) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.64$

λ	l	$\sigma_{lu} / \sigma_{0.2}$
0.2	613.1761	0.648
0.4	1226.352	0.631
0.6	1839.528	0.627
0.8	2452.704	0.607
1	3065.88	0.530
1.2	3679.057	0.471
1.4	4292.233	0.417
1.6	4905.409	0.342
1.8	5518.584	0.278
2	6131.761	0.226

表 B.2 A5083-O

(a) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.71$

λ	l	$\sigma_{lu} / \sigma_{0.2}$
0.2	858.4465	0.760
0.4	1716.893	0.792
0.5	2146.116	0.799
0.6	2575.34	0.788
0.7	3004.563	0.726
0.8	3433.786	0.661
0.9	3863.009	0.601
1	4292.233	0.547
1.1	4721.456	0.497
1.2	5150.679	0.451
1.4	6009.126	0.371
1.6	6867.572	0.305
1.8	7726.019	0.253
2	8584.465	0.212

(b) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.65$

λ	l	$\sigma_{lu} / \sigma_{0.2}$
0.2	858.4465	0.715
0.4	1716.893	0.740
0.6	2575.34	0.751
0.8	3433.786	0.660
1	4292.233	0.547
1.2	5150.679	0.451
1.4	6009.126	0.371
1.6	6867.572	0.305
1.8	7726.019	0.253
2	8584.465	0.212

(c) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.64$

λ	l	$\sigma_{lu} / \sigma_{0.2}$
0.2	858.4465	0.668
0.4	1716.893	0.676
0.6	2575.34	0.685
0.8	3433.786	0.652
1	4292.233	0.546
1.2	5150.679	0.451
1.4	6009.126	0.371
1.6	6867.572	0.305
1.8	7726.019	0.253
2	8584.465	0.212

(d) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.63$

λ	l	$\sigma_{lu} / \sigma_{0.2}$
0.2	858.4465	0.647
0.4	1716.893	0.638
0.6	2575.34	0.616
0.8	3433.786	0.611
1	4292.233	0.543
1.1	4721.456	0.496
1.2	5150.679	0.451
1.4	6009.126	0.371
1.6	6867.572	0.305
1.8	7726.019	0.253
2	8584.465	0.212

(e) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.626$

λ	l	$\sigma_{lu} / \sigma_{0.2}$
0.2	858.4465	0.642
0.4	1716.893	0.633
0.5	2146.116	0.622
0.6	2575.34	0.600
0.7	3004.563	0.593

0.8	3433.786	0.589
0.9	3863.009	0.573
1	4292.233	0.538
1.2	5150.679	0.450
1.4	6009.126	0.370
1.6	6867.572	0.305
1.8	7726.019	0.253
2	8584.465	0.212

(f) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.61$

λ	l	$\sigma_{lu} / \sigma_{0.2}$
0.2	858.4465	0.627
0.4	1716.893	0.610
0.6	2575.34	0.548
0.8	3433.786	0.504
1	4292.233	0.475
1.2	5150.679	0.429
1.4	6009.126	0.364
1.6	6867.572	0.302
1.8	7726.019	0.251
2	8584.465	0.210

(g) $\sigma_{lu} / \sigma_{0.2} = 0.6$

λ	l	$\sigma_{lu} / \sigma_{0.2}$
0.2	858.4465	0.617876
0.4	1716.893	0.586022
0.6	2575.34	0.512327
0.8	3433.786	0.456685
1	4292.233	0.415997
1.2	5150.679	0.381099
1.4	6009.126	0.341041
1.8	7726.019	0.24474
1.6	6867.572	0.291797
2	8584.465	0.205487

付録 C 数値データ

(a) A6061-T6

λ	l	$M_u/(g_w M_Y)$
0.248	398.342	0.855
0.372	597.512	0.853
0.496	796.683	0.849
0.620	995.854	0.838
0.744	1195.025	0.817
0.867	1394.196	0.776
0.991	1593.366	0.721
1.115	1792.537	0.652
1.239	1991.708	0.576
1.487	2390.050	0.443

(b) A5083-O

λ	l	$M_u/(g_w M_Y)$
0.233	643.872	0.814
0.350	965.807	0.793
0.467	1287.743	0.777
0.584	1609.679	0.745
0.700	1931.615	0.715
0.817	2253.550	0.666
0.934	2575.486	0.609
1.167	3219.358	0.492