

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 42

2016年2月

大阪大学大学院工学研究科

鳥畑一博, 大倉一郎

概要

本研究では、最初に、曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力式を誘導する。次に、この式の妥当性を有限要素法による弾塑性有限変位解析によって明らかにする。考慮するアルミニウム合金は A6061-T6 と A5083-O である。

目次

第 1 章 序論	・ ・ ・ 1
第 2 章 考慮するアルミニウム合金桁	・ ・ ・ 2
第 3 章 耐荷力式の誘導	・ ・ ・ 3
第 4 章 圧縮を受けるフランジの水平耐荷力	・ ・ ・ 7
4.1 FEM による弾塑性有限変位解析	・ ・ ・ 7
4.2 フランジの耐荷力曲線	・ ・ ・ 10
第 5 章 曲げを受ける桁の耐荷力	・ ・ ・ 12
5.1 FEM による弾塑性有限変位解析	・ ・ ・ 12
5.2 A6061-T6 桁の曲げ耐荷力	・ ・ ・ 17
5.3 A5083-O 桁の曲げ耐荷力	・ ・ ・ 25
5.3.1 非接合桁	・ ・ ・ 25
5.3.2 接合桁	・ ・ ・ 33
5.4 係数 K の意味	・ ・ ・ 38
5.5 耐荷力式の確認	・ ・ ・ 40
5.5.1 増厚接合された A6061-T6 桁	・ ・ ・ 40
5.5.2 A5083-O 桁におけるウェブの残留応力の影響	・ ・ ・ 42
第 6 章 結論	・ ・ ・ 44
参考文献	・ ・ ・ 46
付録 A 増厚接合された A6061-T6 板の曲げ耐荷力	・ ・ ・ 47
付録 B 端部接合された A5083-O 板の曲げ耐荷力	・ ・ ・ 51
付録 C FEM 解析の数値データ [図-4.5]	・ ・ ・ 53
付録 D 長形板の要素分割数	・ ・ ・ 54
付録 E 桁の断面寸法	・ ・ ・ 55
付録 F FEM 解析の数値データ [図-5.4 と 5.5]	・ ・ ・ 58
付録 G FEM 解析の数値データ [図-5.8 と 5.9]	・ ・ ・ 60
付録 H FEM 解析の数値データ [図-5.12 と 5.13]	・ ・ ・ 62

付録 I	FEM 解析の数値データ [図-5.17]	・・・63
付録 J	FEM 解析の数値データ [図-5.18]	・・・64
付録 K	耐荷力曲線と解析値の比較	・・・65

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年頃から歩道橋や道路橋の拡幅歩行者用アルミニウム床版に使用されてきた¹⁾。2011年には、道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋の試験施工が開始された²⁾。道路橋用アルミニウム床版を支持する桁もアルミニウム合金材で製作することにより、軽量化による橋の耐震性の向上、および高い耐食性による維持管理費の縮減を図ることが期待される。

図-1.1に示すように、従来のアルミニウム歩道橋の桁の製作方法は、鋼桁のそれと同じで、アルミニウム合金 A5083-O の圧延板を MIG 溶接による隅肉溶接で連結することにより製作される。道路橋は歩道橋より規模が大きく、歩道橋に比べて設計荷重が格段に大きくなるため、0.2%耐力の低い A5083-O を用いて道路橋の桁を設計することは困難である。道路橋のアルミニウム合金桁の設計には、0.2%耐力の高いアルミニウム合金 A6061-T6 の使用が必須である。しかし、A6061-T6 は熱処理によって 0.2%耐力が高められているので、MIG 溶接を施すと溶接部の 0.2%耐力が母材のその約半分まで低下する。図-1.1に示す桁を A6061-T6 で製作すると、垂直補剛材が存在する位置で、MIG 溶接がウェブの一断面を横断するので、桁としての強度が低下する。そこで、A6061-T6 を活かす桁構造として、図-1.2に示すような、T 型断面の押出形材を摩擦攪拌接合によって突合せ接合し、等間隔に縦補剛されたウェブを有するアルミニウム合金桁が提案された³⁾。

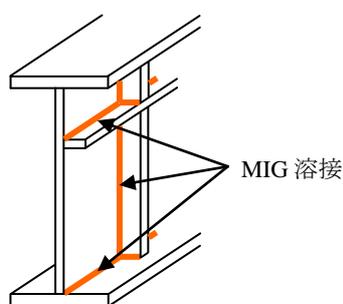


図-1.1 従来のアルミニウム合金桁

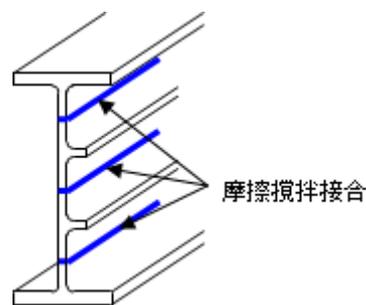


図-1.2 縦補剛されたアルミニウム合金桁

アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）（以後 JSCE 指針と呼ぶ）⁴⁾ が 2015 年 3 月に制定された。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未だ規定されていない。

このような状況で、本研究は、曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力を明らかにすることを目的とする。ただし、図-1.1 と 1.2 に示す補剛桁の曲げ耐荷力の基本を与える研究として、本研究では、無補剛桁を対象とする。

第2章 考慮するアルミニウム合金桁

桁高が低い場合、A6061-T6 の I 型断面の押出型材を桁として使用することができる。桁高が高くなると、図-1.2 に示すように、複数の押出型材を摩擦攪拌接合により突き合わせ接合する必要がある。A6061-T6 は熱処理合金であるため、摩擦攪拌接合を施すと接合中心から各側で、最大 25mm の範囲で強度が低下する⁵⁾。そこで、図-2.1 に示すように、次式で与えられる板厚をこの範囲の厚さに与えることにより、0.2%耐力に関して、この範囲の断面強度は母材の断面強度と同じになる⁴⁾。

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

ここに、 t_j : 接合部の板厚
 $\sigma_{0.2}$: 母材の 0.2% 耐力
 $\sigma_{j0.2}$: 接合部の 0.2% 耐力
 t : 母材の板厚

式(2.1)によって増厚された接合部を有する板の曲げ耐荷力は、非接合の板のそれより高くなる（付録 A 参照）。したがって A6061-T6 に対しては非接合桁のみを考慮する。

他方、桁高が低い場合、A5083-O の I 型断面の押出型材を桁として使用することができるが、桁高が高くなると、図-1.1 に示すように、A5083-O のウェブをフランジに、MIG 溶接による隅肉溶接で連結することにより桁が製作される。したがって A5083-O に対しては、非接合桁と接合桁を考慮する。

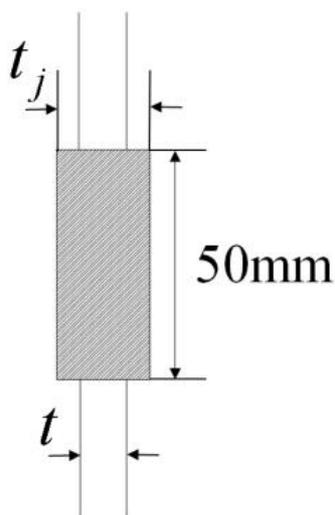


図-2.1 部分的に増厚された板

第3章 耐荷力式の誘導

次式に示すように、曲げを受ける桁の終局曲げモーメント M_u は、フランジによって与えられる終局曲げモーメントとウェブによって与えられる終局曲げモーメントの和として与えられると仮定する。

$$M_u = M_{fu} + M_{wu} \quad (3.1)$$

ここに、 M_u : 桁の終局曲げモーメント

M_{fu} : フランジによって与えられる終局曲げモーメント

M_{wu} : ウェブによって与えられる終局曲げモーメント

上下対称の桁の場合、[図-3.1](#)を参照して、フランジによって与えられる終局曲げモーメントは次式で与えられる。

$$M_{fu} = b_w (\sigma_{fu} A_f) \quad (3.2)$$

ここに、 A_f : フランジの断面積

b_w : ウェブの幅

σ_{fu} : 圧縮を受けるフランジの水平耐荷力

式(3.2)においては、フランジの板厚 t_f がウェブの幅 b_w と比較して十分に小さいことが仮定されている。

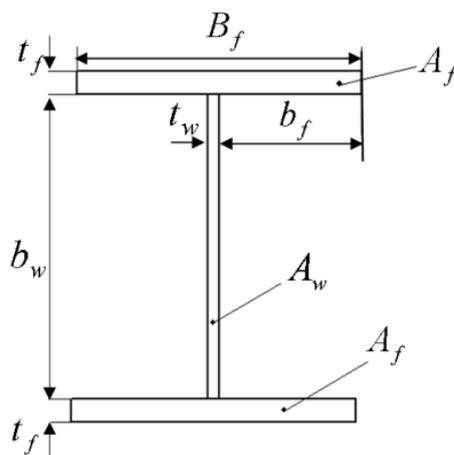


図-3.1 I型桁の断面

ウェブによって与えられる終局曲げモーメントは次式で与えられる。

$$M_{wu} = \frac{t_w b_w^2}{6} \sigma_{wu} = \frac{1}{6} A_w b_w \sigma_{wu} \quad (3.3)$$

ここに、 A_w : ウェブの断面積

t_w : ウェブの板厚

σ_{wu} : ウェブの弾性断面係数を基準としたウェブの耐荷力
式(3.2)と(3.3)を式(3.1)に代入して、桁の終局曲げモーメントが次式で与えられる。

$$M_u = b_w \left(A_f \sigma_{fu} + \frac{1}{6} A_w \sigma_{wu} \right) \quad (3.4)$$

上下対称の I 型断面の桁の断面二次モーメントは、

$$I = \frac{t_w b_w^3}{12} + 2 \left\{ \frac{B_f t_f^3}{12} + t_f B_f \left(\frac{b_w + t_f}{2} \right)^2 \right\} \cong \frac{A_w b_w^2}{12} + \frac{A_f b_w^2}{2} \quad (3.5)$$

で近似され、その弾性断面係数 W は次式で近似される。

$$W = \frac{I}{\frac{b_w + 2t_f}{2}} \cong b_w \left(A_f + \frac{A_w}{6} \right) \quad (3.6)$$

式(3.6)を用いて、桁の降伏曲げモーメント M_Y は次式で与えられる。

$$M_Y = \sigma_{0.2} W = \sigma_{0.2} b_w \left(A_f + \frac{A_w}{6} \right) \quad (3.7)$$

ここに、 $\sigma_{0.2}$: アルミニウム合金の 0.2% 耐力

式(3.4)を式(3.7)で除すことにより、降伏曲げモーメントで無次元表示された桁の終局曲げモーメントが次式で与えられる。

$$\frac{M_u}{M_Y} = \frac{\sigma_{fu} + \frac{A_w}{6A_f} \sigma_{wu}}{\sigma_{0.2} \left(1 + \frac{A_w}{6A_f} \right)} = \frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} \frac{1 + \frac{A_w}{6A_f} \frac{\sigma_{wu}}{\sigma_{fu}}}{1 + \frac{A_w}{6A_f}} \quad (3.8)$$

フランジの水平耐荷力 σ_{fu} はアルミニウム合金材の 0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ より小さい。したがって、式(3.8)の σ_{wu}/σ_{fu} の σ_{fu} を $\sigma_{0.2}$ に置き換えることによって、 M_u/M_Y を低めに推定する式として次式を得る。

$$\frac{M_u}{M_Y} = \frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} \frac{1 + \frac{A_w}{6A_f} \frac{\sigma_{wu}}{\sigma_{0.2}}}{1 + \frac{A_w}{6A_f}} \quad (3.9)$$

曲げを受ける長方形板の耐荷力が次式で与えられている⁶⁾。

$$\frac{\sigma_{wu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1.5 & (R \leq R_0) \\ 1.5 - 0.7 \frac{R - R_0}{R_2 - R_0} & (R_0 \leq R \leq R_2) \\ 0.8 \left(\frac{R_2}{R} \right)^m & (R_2 \leq R \leq 2) \end{cases} \quad (3.10)$$

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2) \sigma_{0.2} b_w}{23.9 E t_w}} \quad (3.11)$$

ここに、 σ_{wu} : 弾性断面係数を基準とした長方形板の耐荷力

R_0, R_2, m : 定数

μ : ポアソン比 (= 0.3)

E : ヤング係数 (= 70 GPa)

R_0, R_2, m の値を表-3.1 に示す。表-3.1 に示す値は、非接合板に対するものである。A5083-O の端部接合板の曲げ耐荷力は非接合板のそれと同じである（付録 B 参照）。同表の R_1 は、 $\sigma_{wu}/\sigma_{0.2}$ が 1 になるときの R の値であり、式(3.10)の中段の式より与えられる。 R_0, R_1, R_2 の間には次の関係がある。

$$R_2 = 1.4R_1 - 0.4R_0 \quad (3.12)$$

表-3.1 $\sigma_{0.2}, R_0, R_1, R_2, m$ の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	R_0	R_1	R_2	m
A6061-T6	245	0.34	0.94	1.18	0.69
A5083-O	125	0.27	0.82	1.04	0.67

式(3.12)を式(3.10)の中段の式に代入して次式を得る。

$$\frac{\sigma_{wu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1.5 & (R \leq R_0) \\ 1.5 - 0.5 \frac{R - R_0}{R_1 - R_0} & (R_0 \leq R \leq R_2) \\ 0.8 \left(\frac{R_2}{R} \right)^m & (R_2 \leq R \leq 2) \end{cases} \quad (3.13)$$

式(3.11)を式(3.13)に代入して次式を得る。

$$\frac{\sigma_{wu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1.5 & \left(\frac{b_w}{t_w} \leq \beta_0 \right) \\ 1.5 - 0.5 \frac{\frac{b_w}{t_w} - \beta_0}{\beta_1 - \beta_0} & \left(\beta_0 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq \beta_2 \right) \\ 0.8 \left(\beta_2 \frac{t_w}{b_w} \right)^m & \left(\beta_2 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq \beta_3 \right) \end{cases} \quad (3.14)$$

ここで、 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ は、それぞれ次式で与えられる。

$$\beta_0 = \pi \sqrt{\frac{23.9 E}{12(1-\mu^2) \sigma_{0.2}}} R_0 \quad (3.15)$$

$$\beta_1 = \pi \sqrt{\frac{23.9}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} R_1 \quad (3.16)$$

$$\beta_2 = 1.4\beta_1 - 0.4\beta_0 \quad (3.17)$$

$$\beta_3 = 2\pi \sqrt{\frac{23.9}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} \quad (3.18)$$

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, m$ の値を表-3.2 に示す.

表-3.2 $\sigma_{0.2}, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, m$ の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	β_0	β_1	β_2	β_3	m
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

式(3.14)で与えられる、面内曲げを受ける長方形板の耐荷力が、桁のウェブに適應できると仮定して、これを式(3.9)に代入して、桁の終局曲げモーメントが次式で与えられる.

$$\frac{M_u}{M_Y} = \frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} g_w \quad (3.19)$$

$$g_w = \begin{cases} \frac{1 + \frac{A_w}{4A_f}}{1 + \frac{A_w}{6A_f}} & \left(\frac{b_w}{t_w} \leq \beta_0 \right) \\ 1 - \frac{\frac{A_w}{A_f} \frac{b_w - \beta_1}{t_w}}{12 \left(1 + \frac{A_w}{6A_f} \right) \beta_1 - \beta_0} & \left(\beta_0 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq \beta_2 \right) \\ \frac{1 + \frac{2A_w}{15A_f} \left(\beta_2 \frac{t_w}{b_w} \right)^m}{1 + \frac{A_w}{6A_f}} & \left(\beta_2 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq \beta_3 \right) \end{cases} \quad (3.20)$$

第4章 圧縮を受けるフランジの水平耐荷力

4.1 FEMによる弾塑性有限変位解析

図-4.1 に示すように、破線で示される、圧縮フランジとウェブが交差する位置で、鉛直方向の変位が拘束された、幅が B_f で、厚さが t_f のフランジが圧縮を受けて水平方向に変形する場合に対する耐荷力を求める。

フランジの局部座屈を扱わないので、フランジの板幅と板厚は、5.1 節で述べるように、圧縮を受ける自由突出板が 0.2%耐力を維持する限界の幅厚比を満たすものとする。この限界の幅厚比は、A6061-T6 と A5083-O に対して、それぞれ 6.28 と 5.82 である(表-5.2 参照)。したがって、A6061-T6 に対して、 $B_f=200\text{mm}$ 、 $t_f=15.91\text{mm}$ 、A5083-O に対して $B_f=200\text{mm}$ 、 $t_f=17.19\text{mm}$ を採用する。

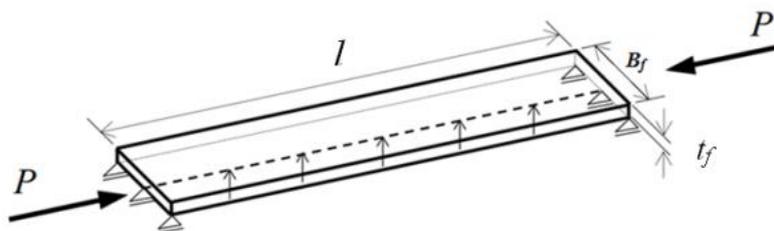


図-4.1 圧縮を受けるフランジ

アルミニウム合金の応力-ひずみ関係は、次式に示す、Ramberg - Osgood 式⁵⁾によって与えられる。

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

ここに、 σ と ε : それぞれ応力とひずみ

E : ヤング係数 (=70 GPa)

n : ひずみ硬化パラメータ

アルミニウム合金の 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ とひずみ硬化パラメータ n の値を表-4.1 に示す⁵⁾。0.2%耐力に対して、JSCE 指針⁴⁾で考慮されている値を用いる。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を施すことによって得られた非超過確率 5%に対する値である⁵⁾。

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
A5083-O	125	5.3

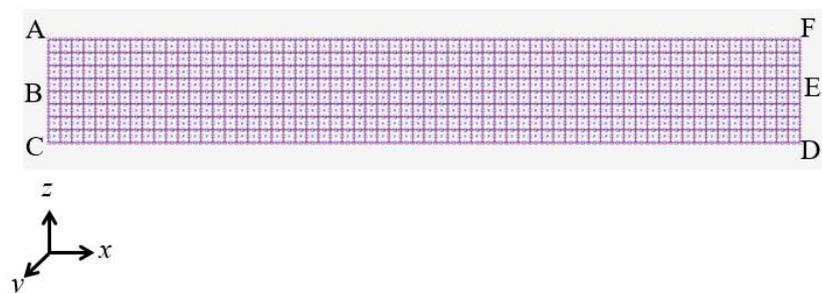


図-4.2 要素分割

表-4.2 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
辺 AC	—	固定	—	—	—
辺 BE	—	固定	—	—	—
辺 DF	固定	—	—	固定	固定
点 B	強制変位	—	固定	—	—

圧縮を受けるフランジの弾塑性有限変位解析を汎用有限要素解析プログラム MARC⁷⁾を用いて行う。解析対象の対称性から、フランジの全長の半分を図-4.2 に示すように要素分割する。

境界条件を表-4.2 に示す。辺 AC と辺 BE の y 軸方向の変位を拘束し、辺 DF に対称性の境界条件を与える。辺 AC に剛棒を設け、点 B の z 軸方向の変位を拘束する。さらに、点 B を x 軸方向に強制変位させることによって、フランジに圧縮荷重を与える。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。3 次元弾性梁要素の伸び剛性とねじり剛性をゼロ、曲げ剛性に大きな値を設定することにより、剛棒を実現する。フランジの 8 節点シェル要素の節点と 3 次元弾性梁要素の節点を共有させる。さらに点 B の位置の節点と辺 AC 上の各節点をタイイングし、点 B の y 軸回りの回転角と辺 AC 上の各節点の y 軸回りの回転角が同じになるようにする。

図-4.3 を参照して、水平方向に対して、次式で与えられるサイン半波形の初期たわみを仮定する。

$$w_0 = \frac{l}{1000} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (4.2)$$

式(4.2)の最大初期たわみ $l/1000$ は、JSCE 指針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る。

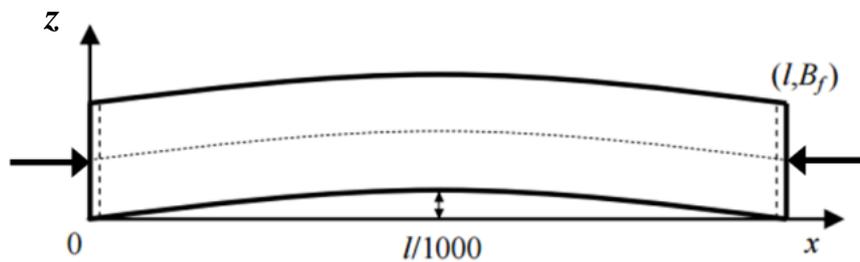


図-4.3 初期たわみ

耐荷力と板幅方向の要素分割数の関係を図-4.4 に示す。これは、アルミニウム合金 A6061-T6 に対して、後述する細長比パラメータ λ_f が 1 のフランジを板幅方向に 4, 8, 16 に等分割して得られる結果である。 σ_{fu} 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割って得られる値である。分割数 4 で十分な精度が得られるが、本研究ではフランジ幅を 8 等分割する。長さ方向の要素分割は、フランジの長さに依存して、1 要素の z 軸方向の長さに対する、 x 軸方向の長さが 0.9 から 1.1 の範囲になるようにする。

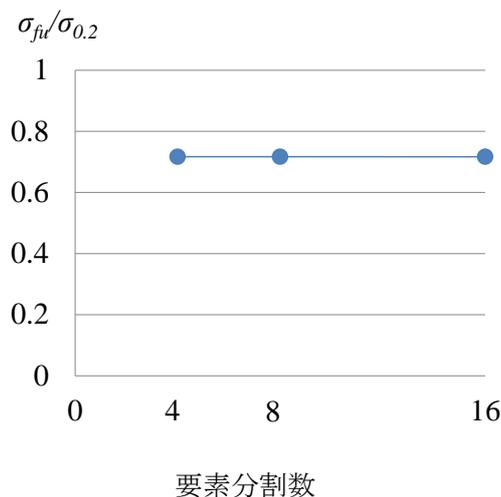


図-4.4 耐荷力と板幅方向の要素分割数の関係

4.2 フランジの耐荷力曲線

圧縮を受けるフランジの細長比パラメータは次式で与えられる。

$$\lambda_f = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{r} \quad (4.3)$$

ここに、 λ_f : 圧縮を受けるフランジの細長比パラメータ

l : フランジの長さ

r はフランジ断面の強軸回りに関する回転半径であり、次式で与えられる。

$$r = \sqrt{\frac{(B_f^3 t_f / 12)}{B_f t_f}} = \frac{B_f}{2\sqrt{3}} \quad (4.4)$$

式(4.4)を式(4.3)に代入して、フランジの細長比パラメータが次式で与えられる。

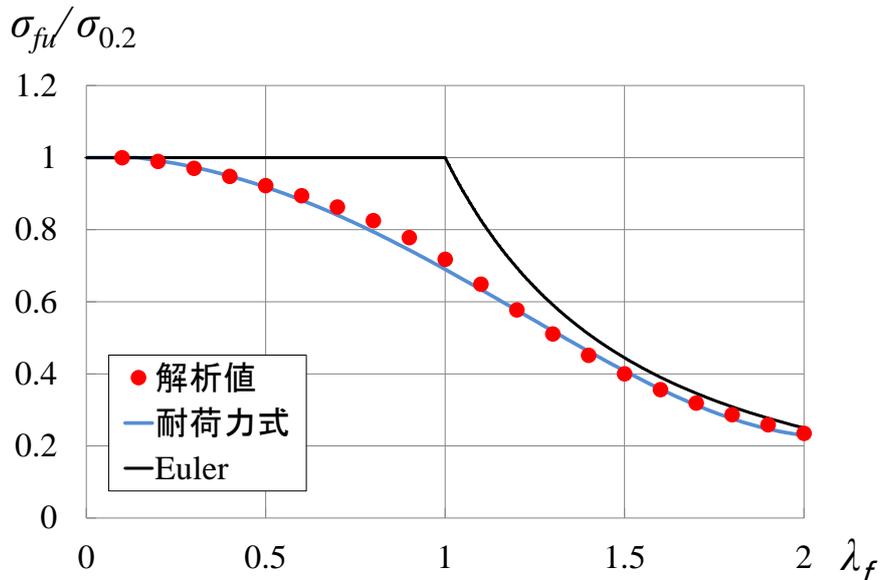
$$\lambda_f = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{B_f} \quad (4.5)$$

フランジの $\sigma_{fu}/\sigma_{0.2}-\lambda_f$ 関係を図-4.5 に示す。解析値に対して4次曲線を仮定し、最小2乗法を適用することによって次式を得る。

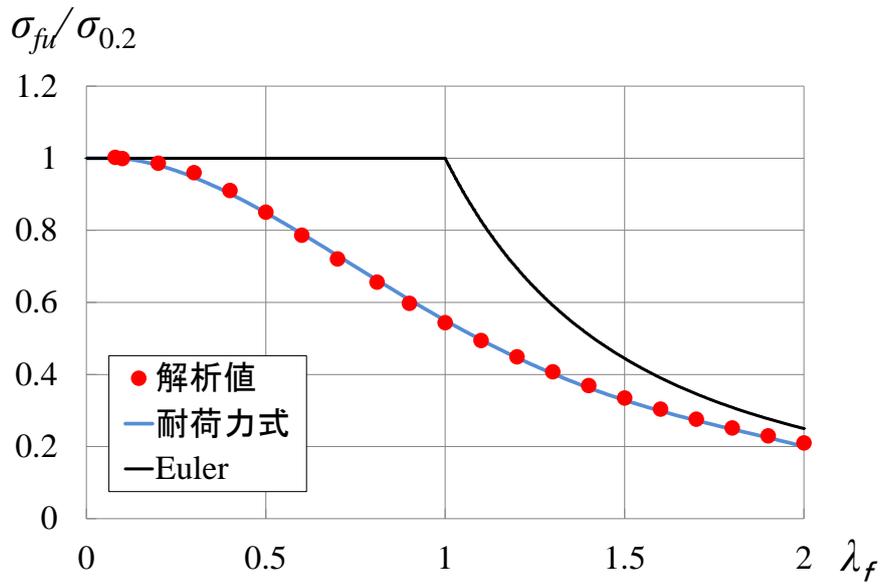
$$\frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda_f \leq \lambda_1) \\ a_0 + a_1 \lambda_f + a_2 \lambda_f^2 + a_3 \lambda_f^3 + a_4 \lambda_f^4 & (\lambda_1 \leq \lambda_f \leq 2) \end{cases} \quad (4.6)$$

ここに、 λ_1 , a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , a_4 : 表-4.3 に示す値。

FEM 解析の数値データを付録 C に示す。



(a) A6061-T6



(b) A5083-O

図-4.5 $\sigma_{fi}/\sigma_{0.2} - \lambda_f$ 関係

表-4.3 $\sigma_{0.2}$, 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	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

第5章 曲げを受ける桁の耐荷力

5.1 FEMによる弾塑性有限変位解析

式(3.19)が与える桁の耐荷力と弾塑性有限変位解析によって得られる桁の耐荷力とを比較することにより、同式の妥当性を示す。

図-5.1を参照して、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。

$$w_0 = \frac{l}{1000} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (5.1)$$

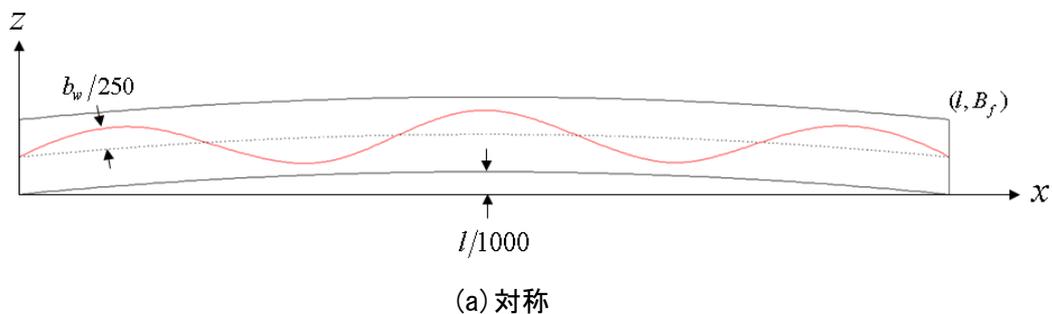
式(5.1)の $l/1000$ は、JSCE 指針⁴⁾で規定される、圧縮部材に許容される最大初期たわみである。

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。

$$w_0 = \frac{b_w}{250} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_w + t_f}\right) + \frac{l}{1000} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (5.2)$$

ここに、 $a = l/n$ (n は整数)

式(5.2)の $b_w/250$ は、JSCE 指針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、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⁶⁾。ただし、 $l < 0.4b_w$ の場合、 $a = l$ とする。図-5.1を参照して、ウェブの初期たわみ形状は、桁の全長に依存して対称と逆対称となる場合が存在する。ウェブの初期たわみ形状が対称となる場合、桁の長さの中央に対称性の境界条件を設けることにより、桁の半分を要素分割する。ウェブの初期たわみ形状が逆対称の場合、桁の全長を要素分割する。



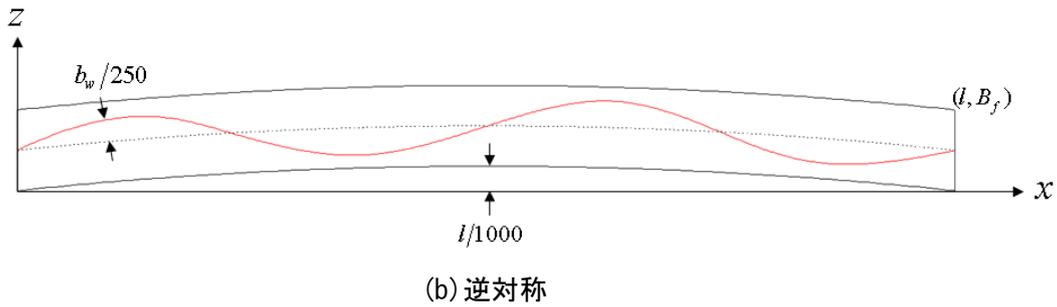


図-5.1 フランジとウェブの初期たわみ

フランジとウェブがMIG溶接による隅肉溶接によって製作されたA5083-OのI型断面の桁の場合、フランジとウェブに生じる残留応力は、隅肉溶接のルートから各側25mmまでが一様な引張残留応力、25mmから離れた位置が一様な圧縮残留応力となる矩形分布で表され、引張残留応力の大きさは母材の0.2%耐力に近いことが明らかにされている⁸⁾。しかし、FEM解析では、シェル要素を用いているため、板厚の存在を考慮することができない。したがって、図-5.2に示すように、板の中央面（赤線で表示）に対して前述の矩形分布の残留応力を仮定する。

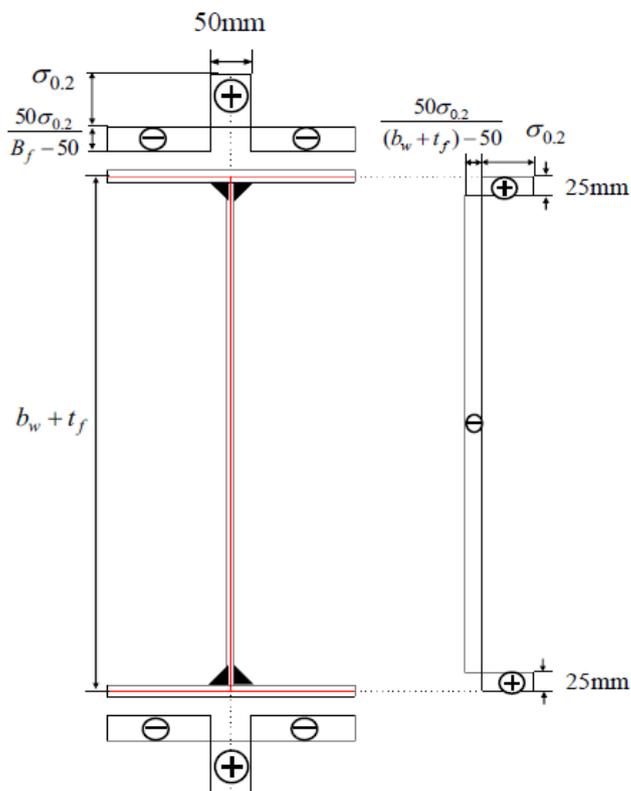


図-5.2 残留応力分布

曲げを受ける I 型断面の桁の弾塑性有限変位解析を MARC⁷⁾を用いて行う。式(4.1)で与えられる応力-ひずみ関係を使用する。A5083-O の接合部は、溶接によって強度が低下しないので、母材と同じ応力-ひずみ関係を使用する。

初期たわみ形状が対称となる場合、すなわちハーフモデルに対する要素分割と境界条件をそれぞれ図-5.3、表-5.1(a)に示す。中点 M を中心として、 $x=0$ 上のウェブの辺 BH 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 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 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。3 次元弾性梁要素の伸び剛性とねじり剛性をゼロ、曲げ剛性に大きな値を設定することにより、剛棒を実現する。さらに、中点 M と辺 BH 上の各節点の z 軸回りの回転をタイピングし、中点 M と辺 BH 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。辺 AC と辺 GI は y 軸回りに自由に回転できる。

初期たわみが逆対称となる場合、すなわちフルモデルに対する境界条件を表-5.1(b)に示す。前述した剛棒を桁の両端に取り付け、両端から曲げ荷重を与える。

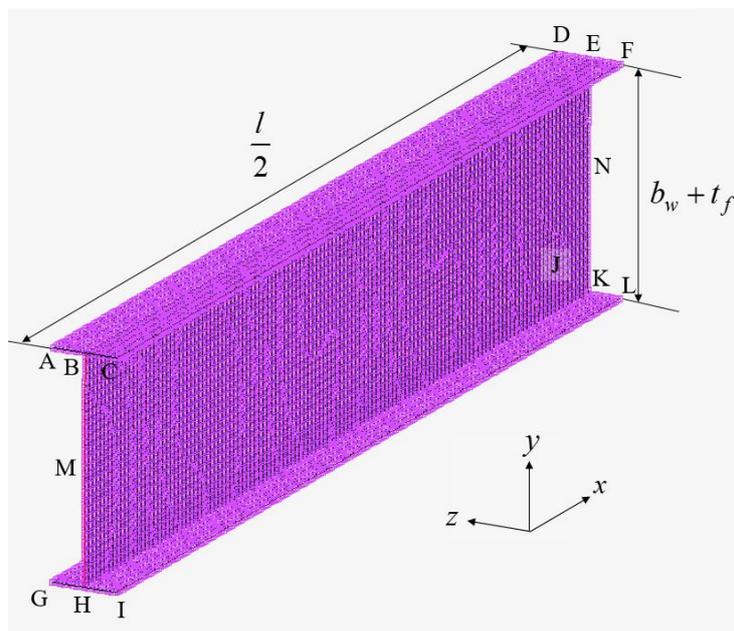


図-5.3 要素分割 (ハーフモデル)

表-5.1 境界条件

(a) ハーフモデル

	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 H	—	固定	固定	—	—
点 C	—	—	固定	—	—
辺 EK 辺 DF 辺 JL	固定	—	—	固定	固定

(b) フルモデル

	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
点 H 点 K	—	固定	固定	—	—
点 C 点 F	—	—	固定	—	—

フランジの要素分割は、4.1 節で述べたように、フランジの全幅を 8 等分割以上とし、x 軸方向の要素分割は、桁の長さに依存して、1 要素の z 軸方向の長さに対する、x 軸方向の長さが 0.9 から 1.1 の範囲になるようにする。ウェブの分割は、高さ方向に 16 分割以上とし、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（付録 D 参照）。接合部に関しては、1 要素の幅を 25mm とすれば十分な精度が得られることが明らかにされている⁹⁾。したがって、上下フランジの接合部の幅は 50mm であるため、2 要素で分割する。ウェブの上下端の接合部の幅は 25mm であるため、1 要素で分割する。

フランジの局部座屈を扱わないので、フランジの板厚を次のように決める。

フランジの片側を自由突出板とみなすと、自由突出板のアルミニウム合金が $\sigma_{0.2}$ を維持する限界の幅厚比が次式で与えられる。

$$\beta_{f1} = \pi \sqrt{\frac{0.425}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} R_{f1} \quad (5.3)$$

ここに、 β_{f1} : 自由突出板のアルミニウム合金が $\sigma_{0.2}$ を維持する限界の幅厚比

R_{f1} : 自由突出板のアルミニウム合金が $\sigma_{0.2}$ を維持する限界の幅厚比パラメータ

$\sigma_{0.2}$, R_{f1} , β_{f1} の値を表-5.2 に示す. R_{f1} の値は文献 9) に与えられている. したがって, 片側のフランジの幅厚比 β_{f0} に対して, A6061-T6 と A5083-O に対してそれぞれ 6 と 5 を採用する (β_{f1} より小さな値を採用したことに特別な意味はない).

b_w/t_w の任意の値を満たす t_w と b_w の値を決め, ウェブの断面積 A_w を求める.

フランジの断面積は次式で与えられる.

$$A_f = (2b_f + t_w)t_f \quad (5.4)$$

b_f は次式で与えられる.

$$b_f = \beta_{f0}t_f \quad (5.5)$$

これを式(5.4)に代入して次式を得る.

$$2\beta_{f0}t_f^2 + t_w t_f - A_f = 0 \quad (5.6)$$

A_w/A_f の任意の値に対する A_f の値を式(5.6)に代入して, t_f が解かれる.

表-5.2 $\sigma_{0.2}$, β_{f1} , R_{f1} の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	R_{f1}	β_{f1}
A6061-T6	245	0.6	6.28
A5083-O	125	0.4	5.82

5.2 A6061-T6 桁の曲げ耐力

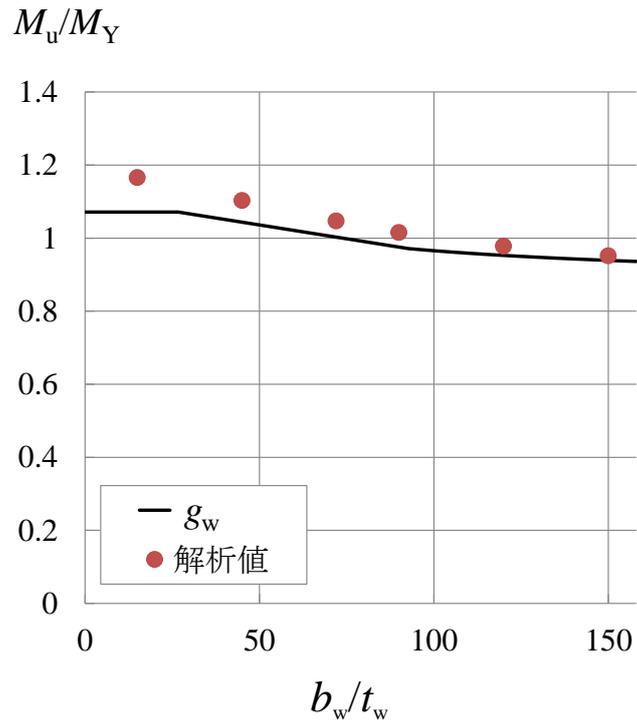
フランジが水平方向に座屈しない場合、 $\sigma_{fu}/\sigma_{0.2}=1.0$ になるので、式(3.19)は次式になる。

$$\frac{M_u}{M_y} = g_w \quad (5.7)$$

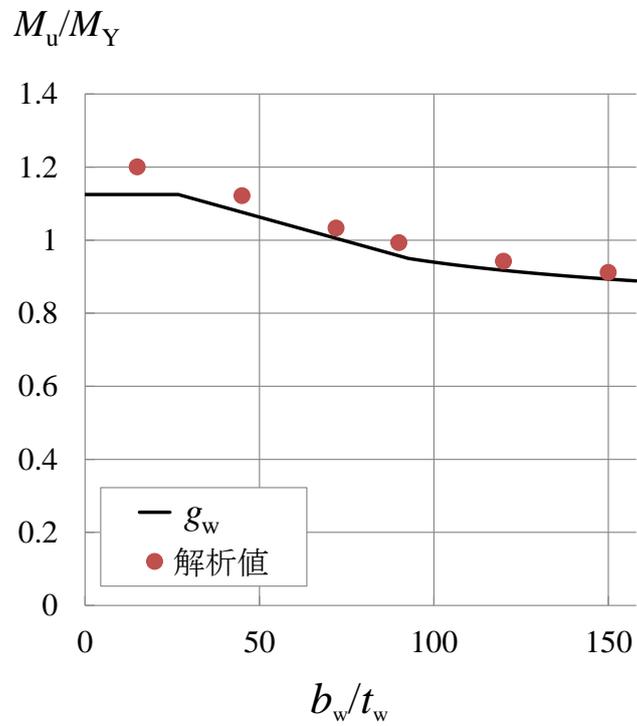
耐力式(5.7)と解析値の比較を図-5.4 に示す。解析値は、 $\lambda_f=0.1$ として、 $A_w/A_f=1, 2, 3, 4$ の各場合に対して、 $b_w/t_w=15, 45, 72, 90, 120, 150$ に対する結果である。桁の断面寸法と解析値の数値データをそれぞれ表-E.1、付録 F に示す。解析値の M_u は、FEM 解析において、桁に強制回転を与えた節点の、荷重が増加しなくなったときの反力曲げモーメントの値である。さらに解析結果の M_u を無次元化する際に使用される降伏モーメント M_y に含まれる弾性断面係数 W は次式によって計算されている。

$$W = \frac{\frac{t_w b_w^3}{12} + 2 \left\{ \frac{B_f t_f^3}{12} + t_f B_f \left(\frac{b_w + t_f}{2} \right)^2 \right\}}{\frac{b_w + 2t_f}{2}} \quad (5.8)$$

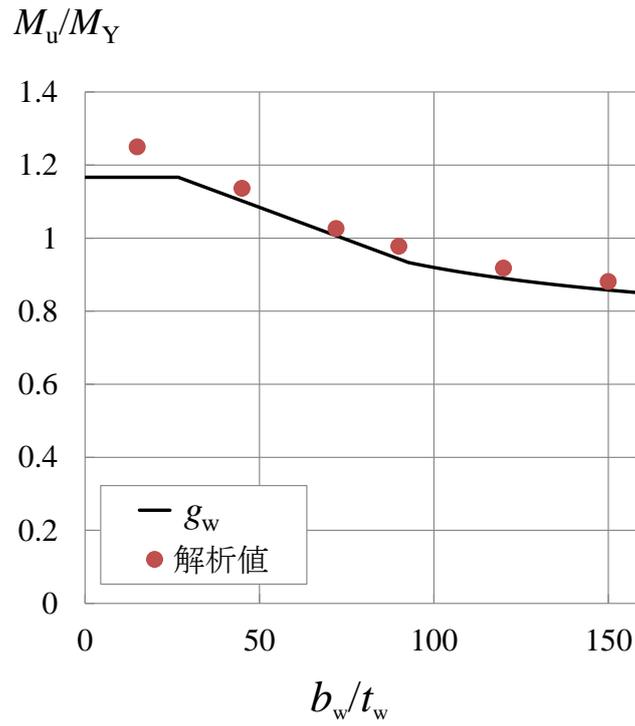
図-5.4 からわかるように、耐力曲線は解析値の幾分低い位置を通過している。これは、耐力が式(3.9)によって安全側に評価されていること、およびウェブが上下フランジによってある程度の回転拘束を受けていることに起因していると考えられる。



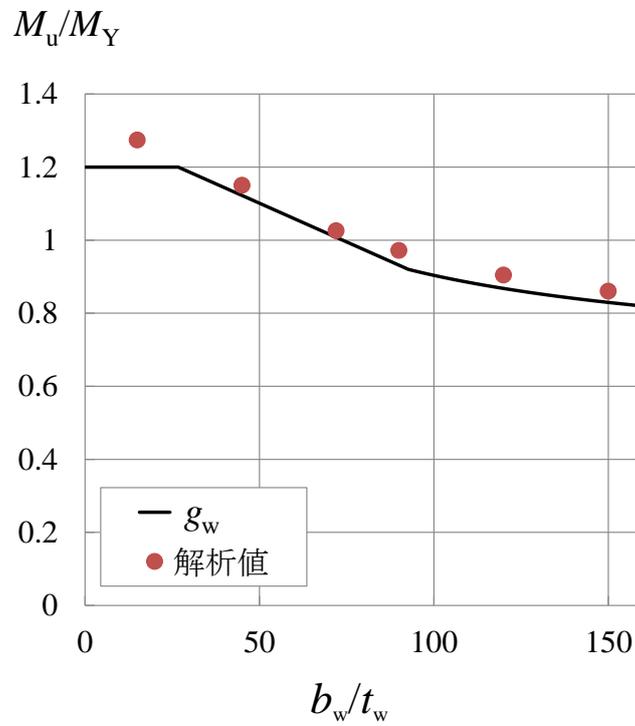
(a) $A_w/A_f = 1$



(b) $A_w/A_f = 2$



(c) $A_w/A_f = 3$



(d) $A_w/A_f = 4$

図-5.4 耐荷力式(5.7)と解析値の比較

式(3.19)は次式に変形できる.

$$\frac{M_u}{g_w M_Y} = \frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} \quad (5.9)$$

フランジに水平方向の座屈を許す場合に対して, 耐荷力式(5.9)と解析値の比較を図-5.5に示す. 解析値は, 図-5.4の $b_w/t_w=15, 45, 72, 90, 120, 150$ の各値に対して λ_f を変化させて算出された M_u を $g_w M_Y$ で無次元化された値である. 解析値の数値データを付録Fに示す.

$A_w/A_f=1$ に対して, 解析値は耐荷力曲線より上に分布している. しかし A_w/A_f が大きくなるに従って, 解析値は低下し, 解析値が耐荷力曲線を下回るようになる. そこで, 係数 K を式(4.5)に導入して, λ_f を次式に修正する.

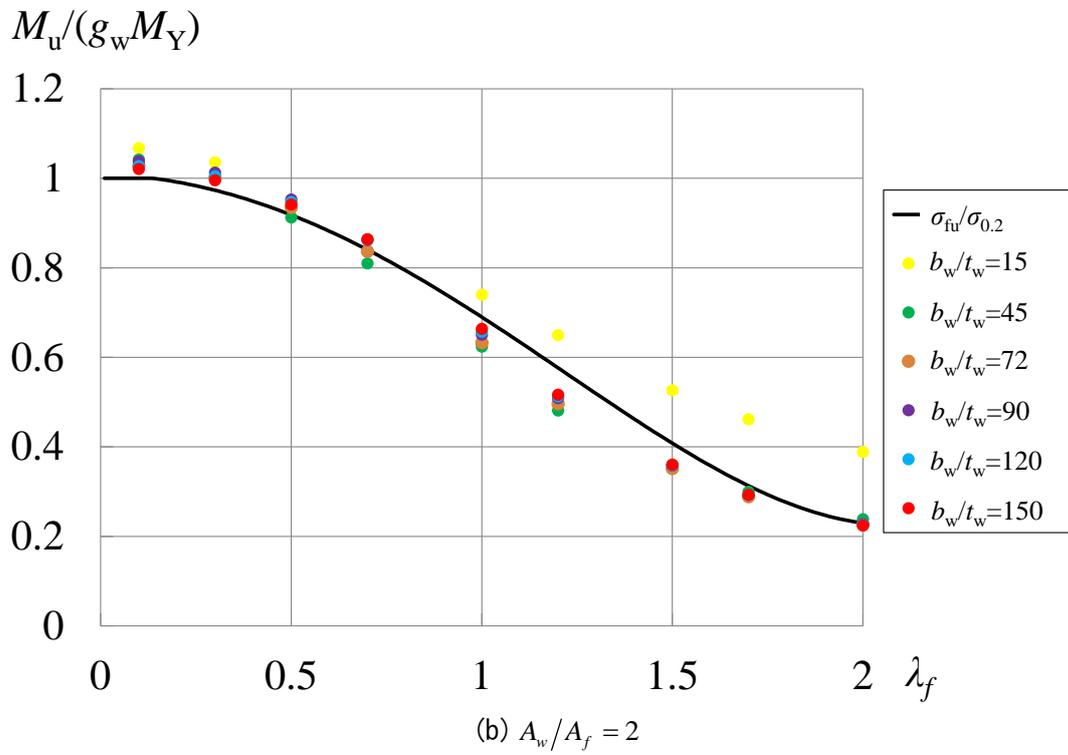
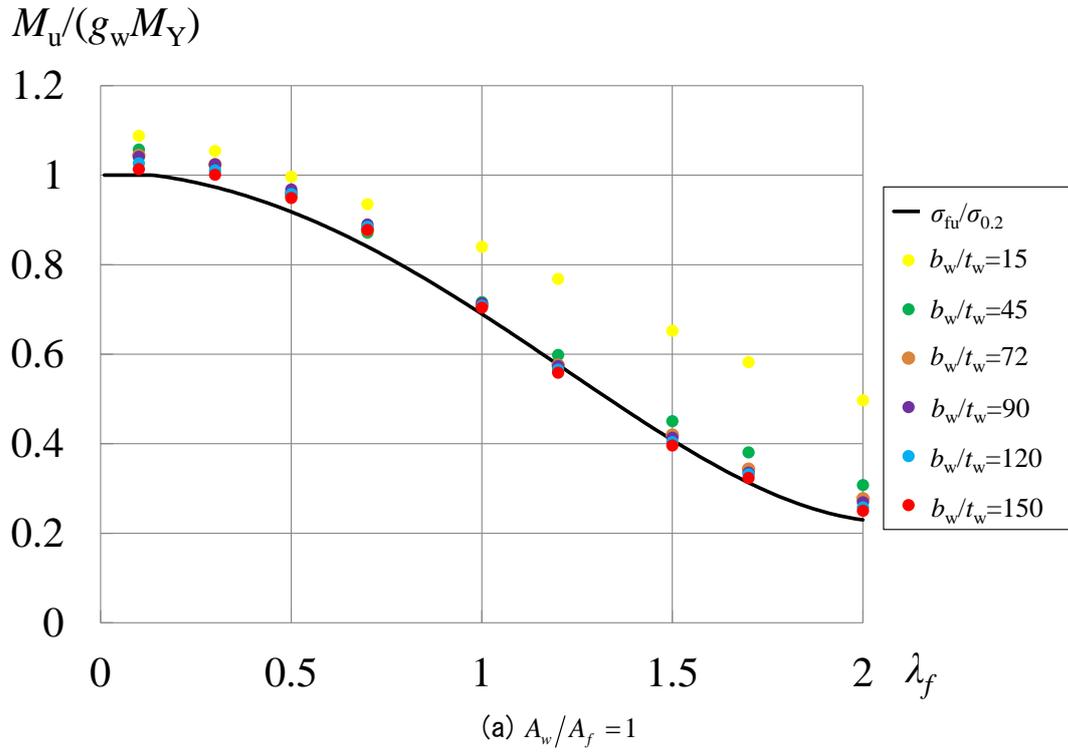
$$\lambda_f = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} K \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{B_f} \quad (5.10)$$

各断面積比において, すべての解析値が耐荷力曲線より右側に移動する最小の値を係数 K に採用する. この様にして決められた係数 K の値を表-5.3に示す. 係数 K と断面積比 A_w/A_f の関係を図-5.6に示す. 両者の関係は次式で近似される.

$$K = \begin{cases} 1 & \left(\frac{A_w}{A_f} \leq 1 \right) \\ 0.87 + 0.13 \frac{A_w}{A_f} & \left(1 \leq \frac{A_w}{A_f} \leq 4 \right) \end{cases} \quad (5.11)$$

表-5.3 係数 K の値

A_w/A_f	K
1	1
2	1.15
3	1.25
4	1.38



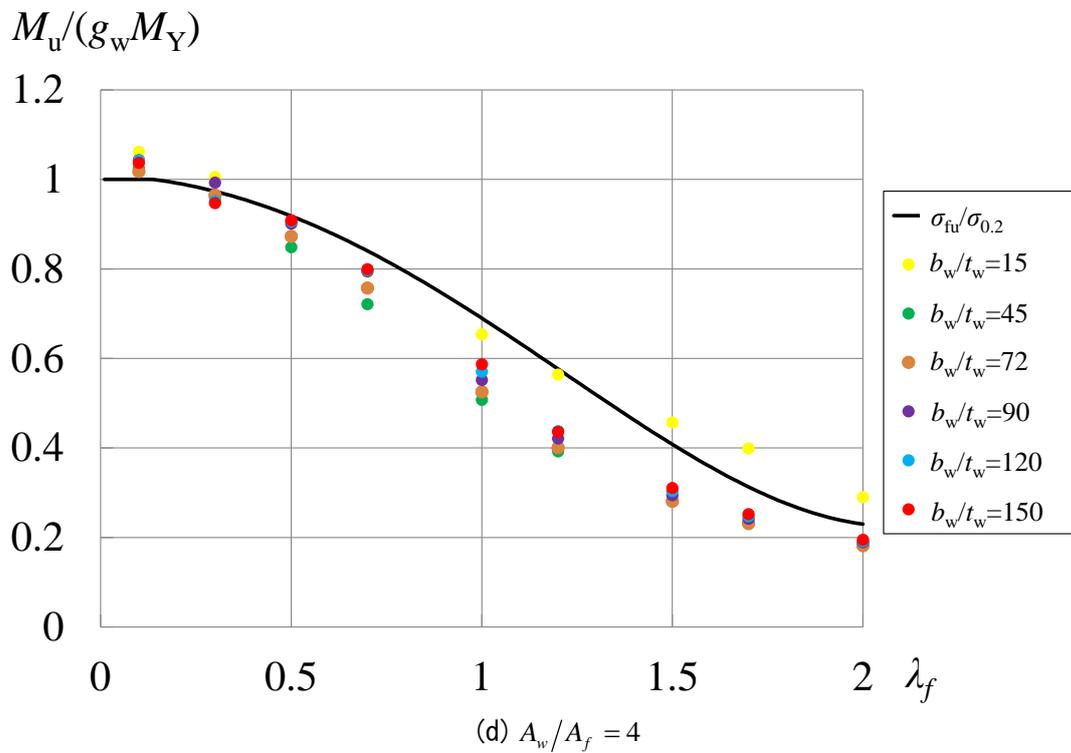
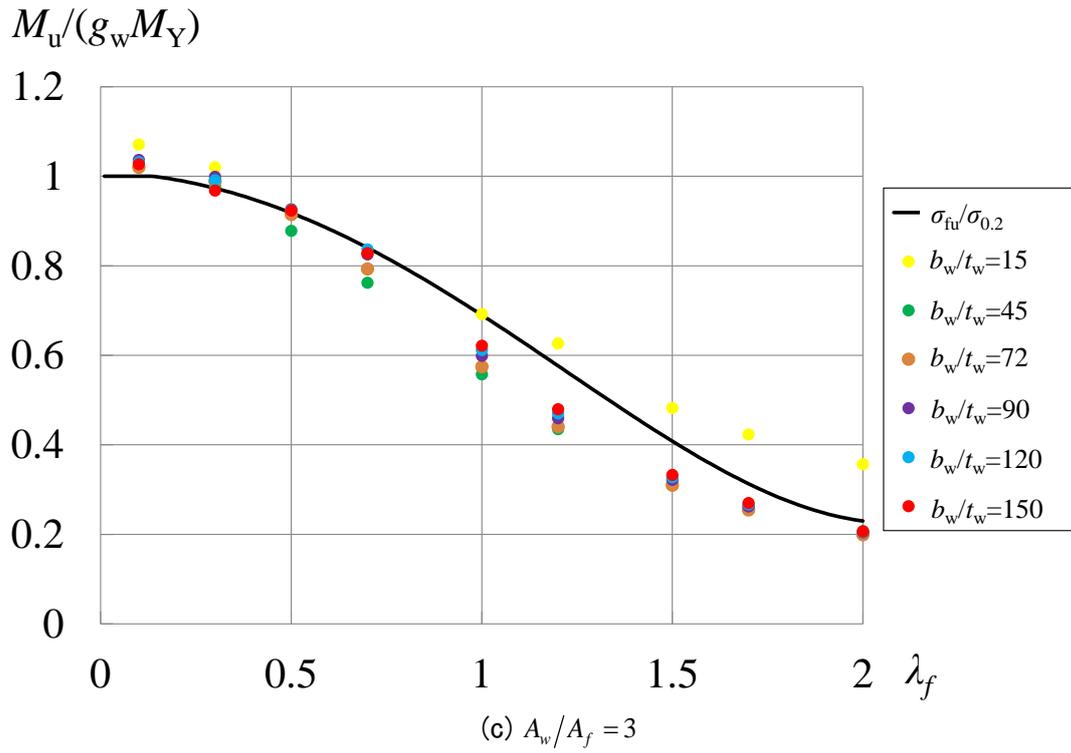


図-5.5 耐荷力式(5.9)と解析値の比較

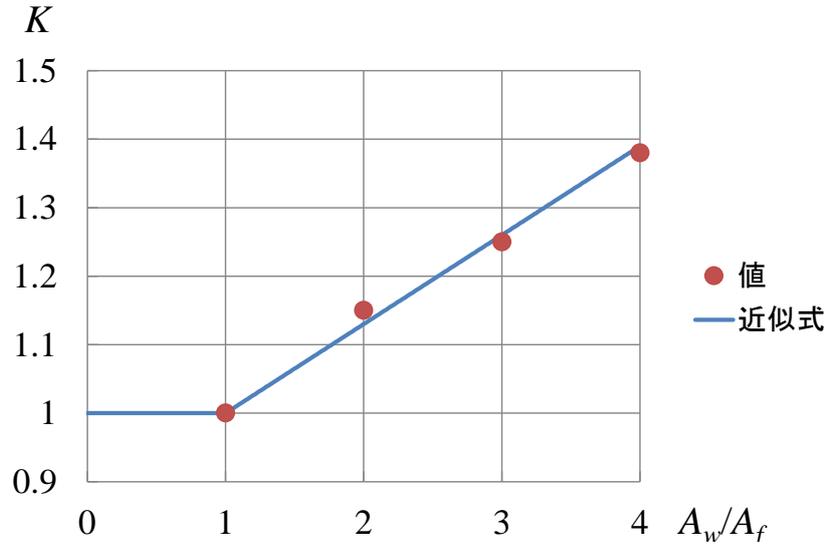
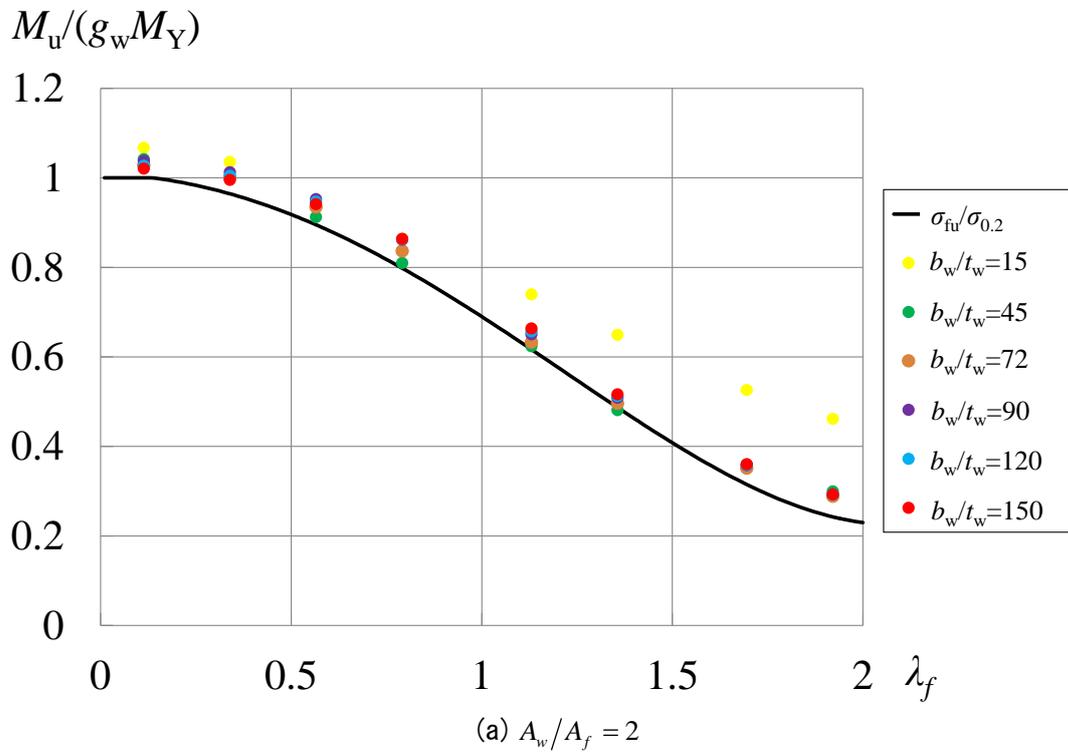


図-5.6 係数 K と断面積比 A_w/A_f の関係

耐荷力式(5.9)と、式(5.10)によってプロットされた解析値の比較を図-5.7に示す。解析値は耐荷力曲線より高い位置に分布している。図-5.7の各図を一つにまとめた図を図-K.1に示す。



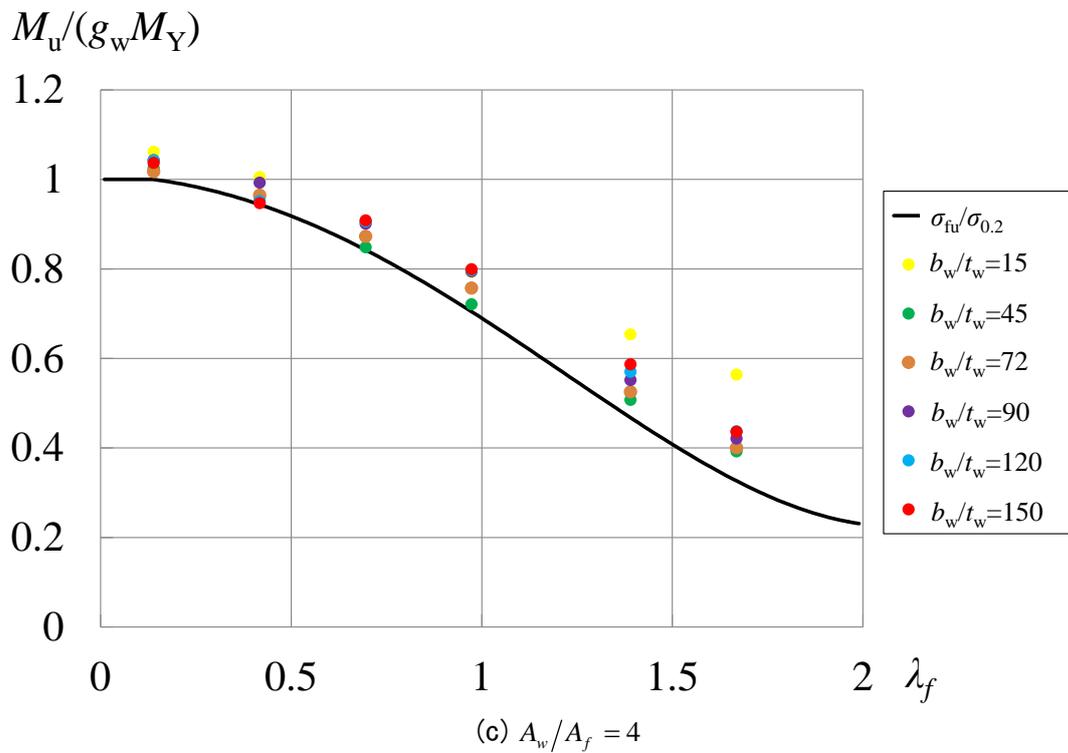
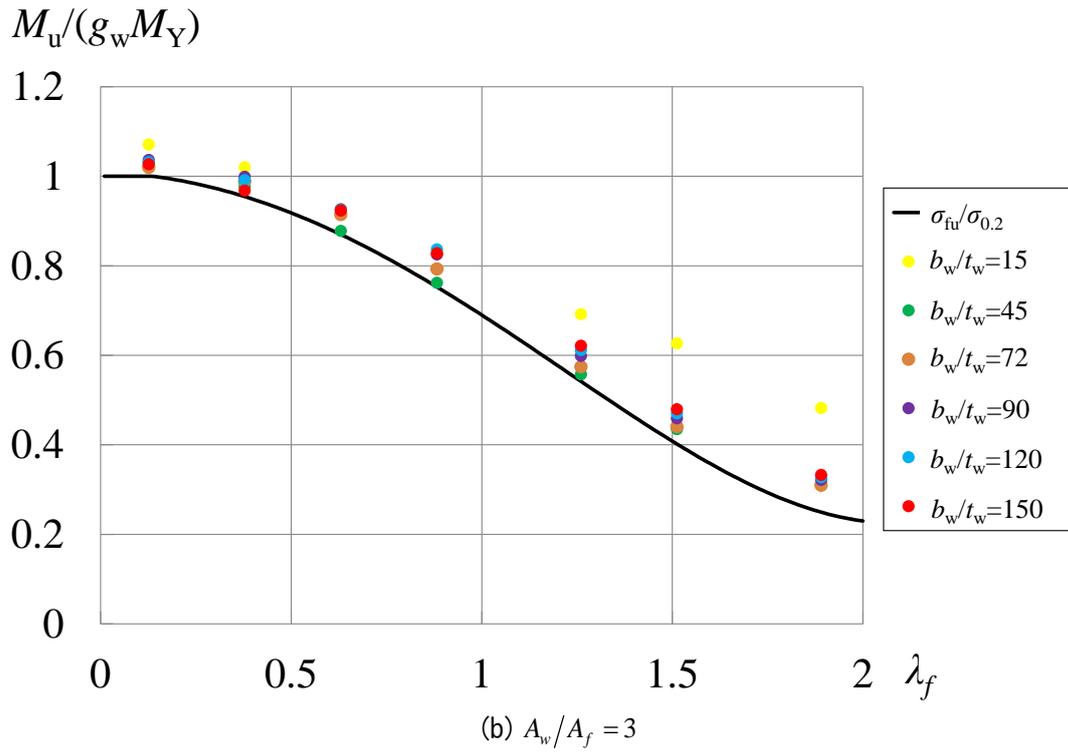


図-5.7 耐荷力式 (5.9) と、式 (5.10) によってプロットされた解析値の比較

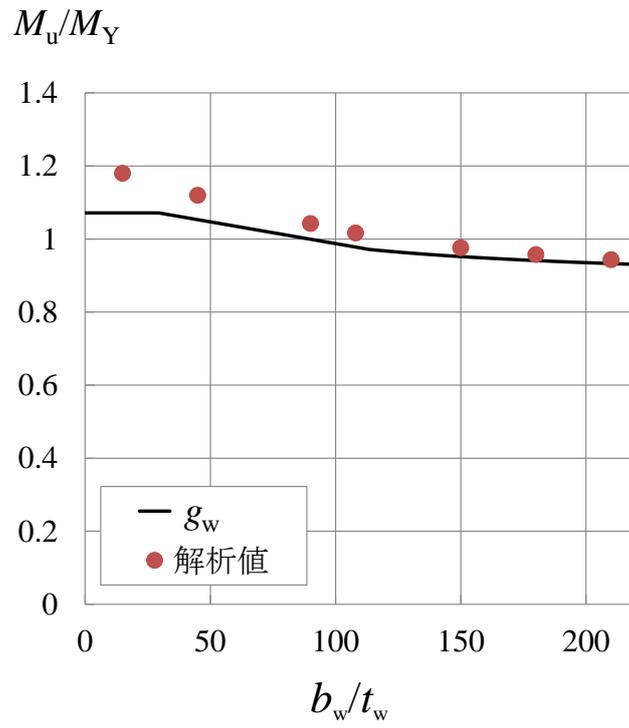
5.3 A5083-0 桁の曲げ耐荷力

5.3.1 非接合桁

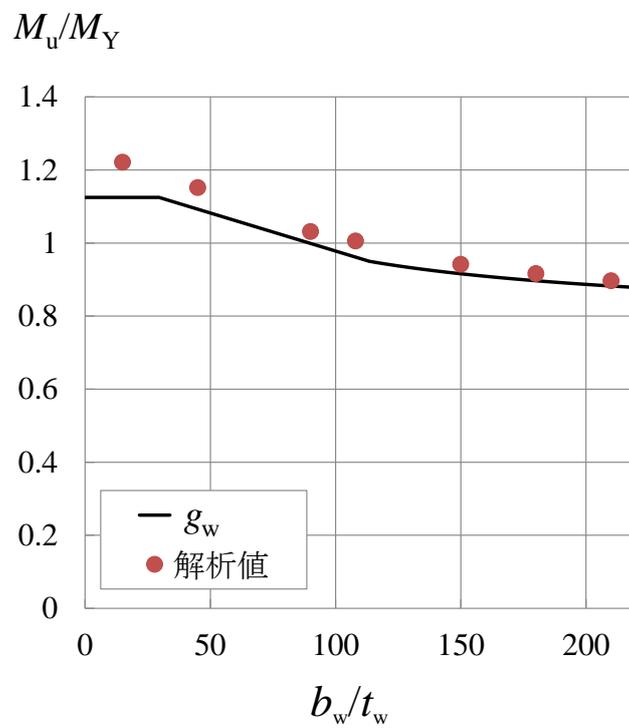
フランジが水平方向に座屈しない場合に対して、耐荷力式(5.7)と解析値の比較を図-5.8に示す。解析は $\lambda_f = 0.08$ で、 $A_w/A_f = 1, 2, 3, 4$ の各場合に対して、 $b_w/t_w = 15, 45, 90, 108, 150, 180, 210$ に対する結果である。桁の断面寸法と解析値の数値データをそれぞれ表-E.2、付録Gに示す。図-5.8からわかるように、耐荷力曲線は解析値の幾分低い位置を通過している。これは、A6061-T6 桁の場合と同様、耐荷力が式(3.9)によって安全側に評価されていること、およびウェブが上下フランジによってある程度の回転拘束を受けていることに起因していると考えられる。

フランジに水平方向の座屈を許す場合に対して、耐荷力式(5.9)と解析値の比較を図-5.9に示す。解析値は、図-5.8の $b_w/t_w = 15, 45, 90, 108, 150, 180, 210$ の各値に対して λ_f を変化させて算出された M_u を $g_w M_Y$ で無次元化された値である。解析値の数値データを付録Gに示す。

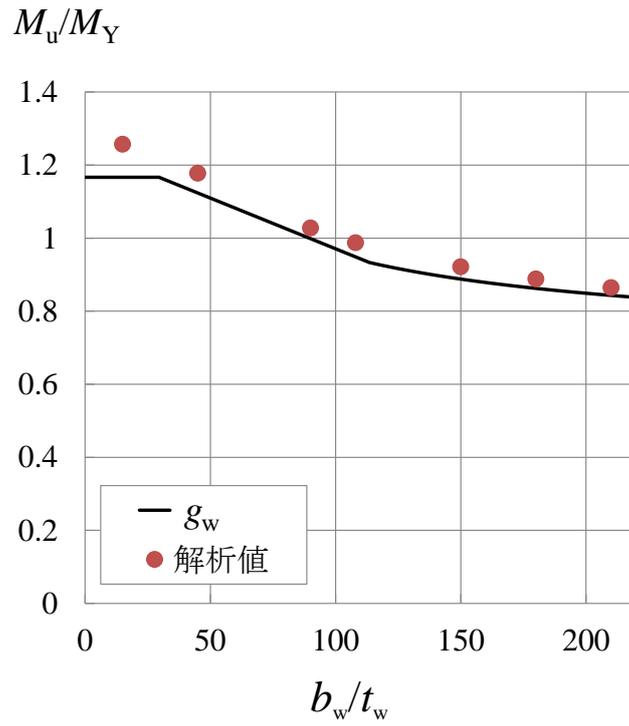
$A_w/A_f = 1$ に対して、解析値は耐荷力曲線より上に分布している。しかし A_w/A_f が大きくなるに従って、解析値は低下し、解析値が耐荷力曲線を下回るようになる。



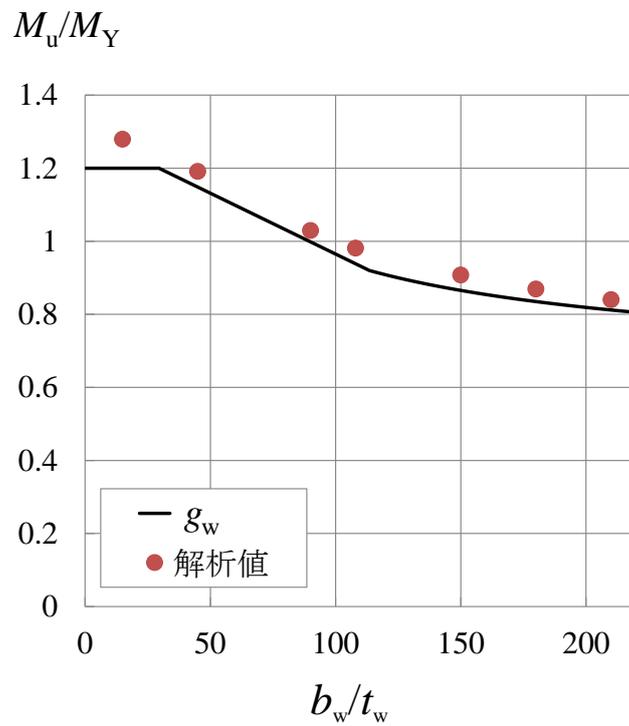
(a) $A_w/A_f = 1$



(b) $A_w/A_f = 2$

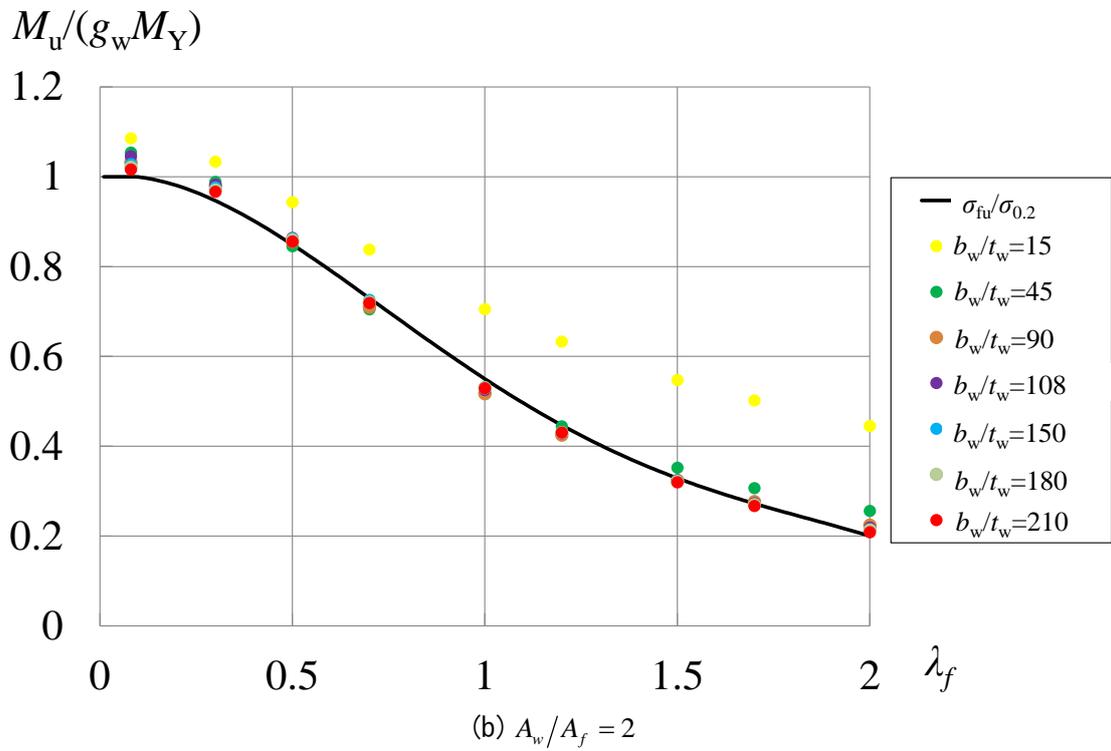
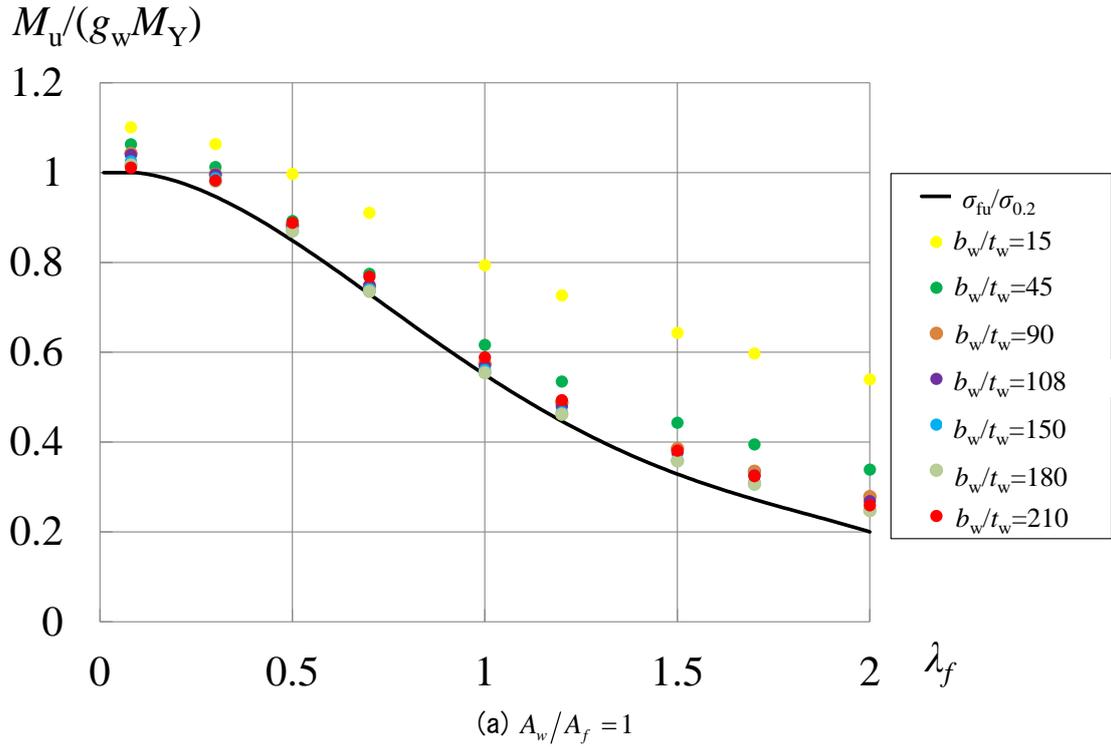


(c) $A_w/A_f = 3$



(d) $A_w/A_f = 4$

図-5.8 耐荷力式(5.7)と解析値の比較



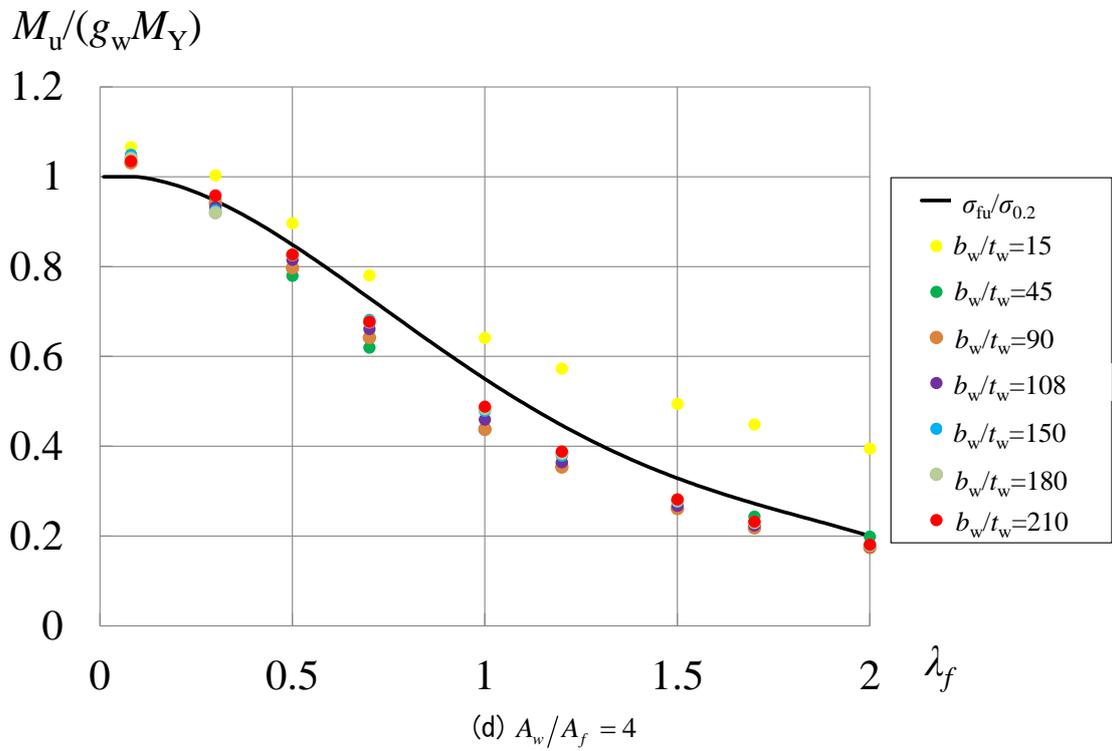
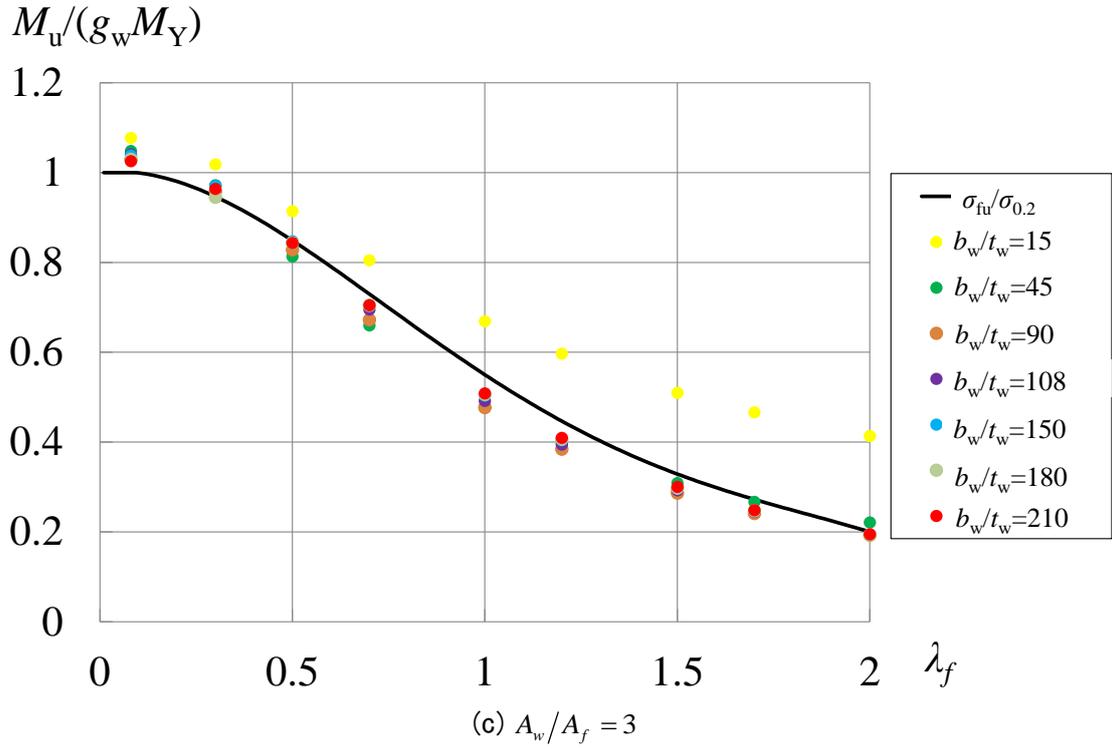


図-5.9 耐荷力式(5.9)と解析値の比較

A6061-T6 桁の場合と同様，各断面積比において，すべての解析値が耐荷力曲線より右側に移動する最小の値を式(5.10)の係数 K に採用する．この様にして決められた係数 K の値を表-5.4 に示す．係数 K と断面積比 A_w/A_f の関係を図-5.10 に示す．両者の関係は次式で近似される．

$$K = \begin{cases} 1 & \left(\frac{A_w}{A_f} \leq 1 \right) \\ 0.91 + 0.09 \frac{A_w}{A_f} & \left(1 \leq \frac{A_w}{A_f} \leq 4 \right) \end{cases} \quad (5.12)$$

表-5.4 係数 K の値

A_w/A_f	K
1	1
2	1.08
3	1.18
4	1.28

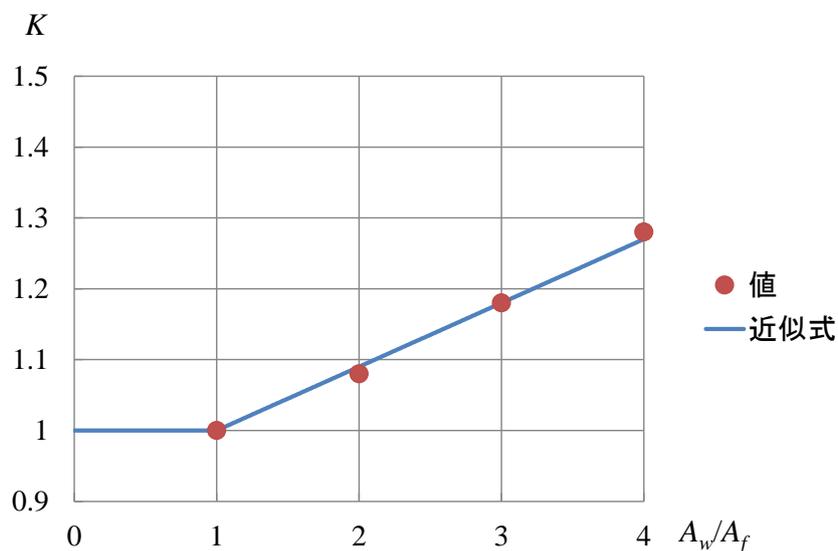
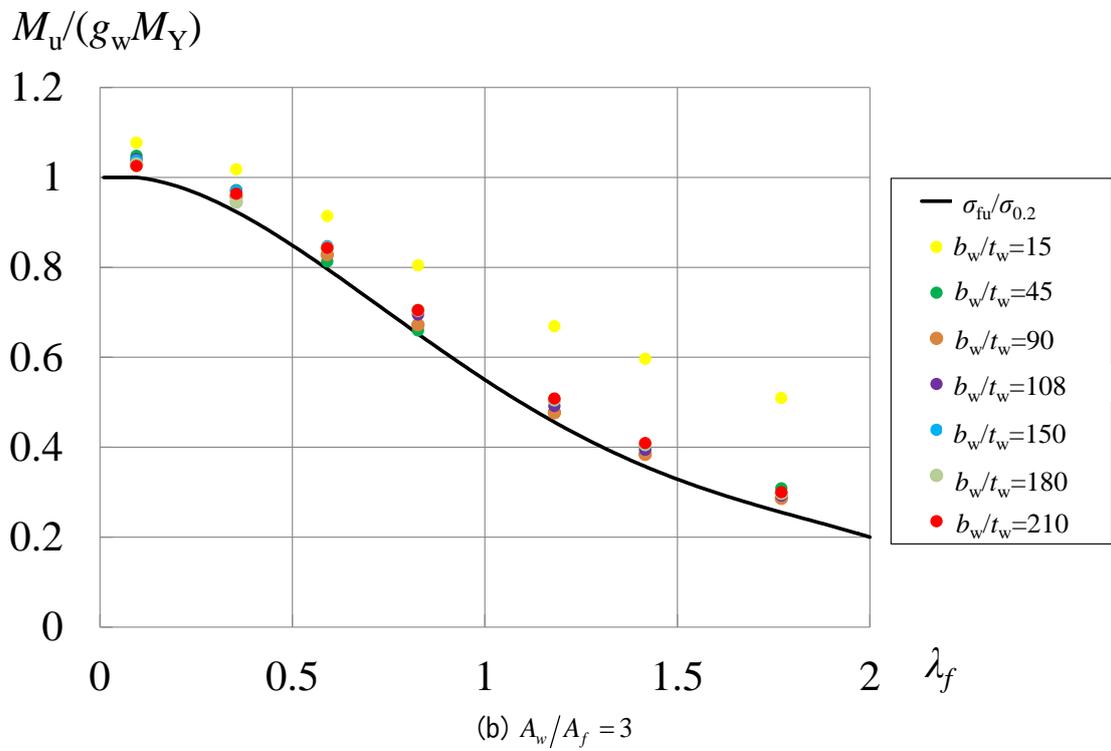
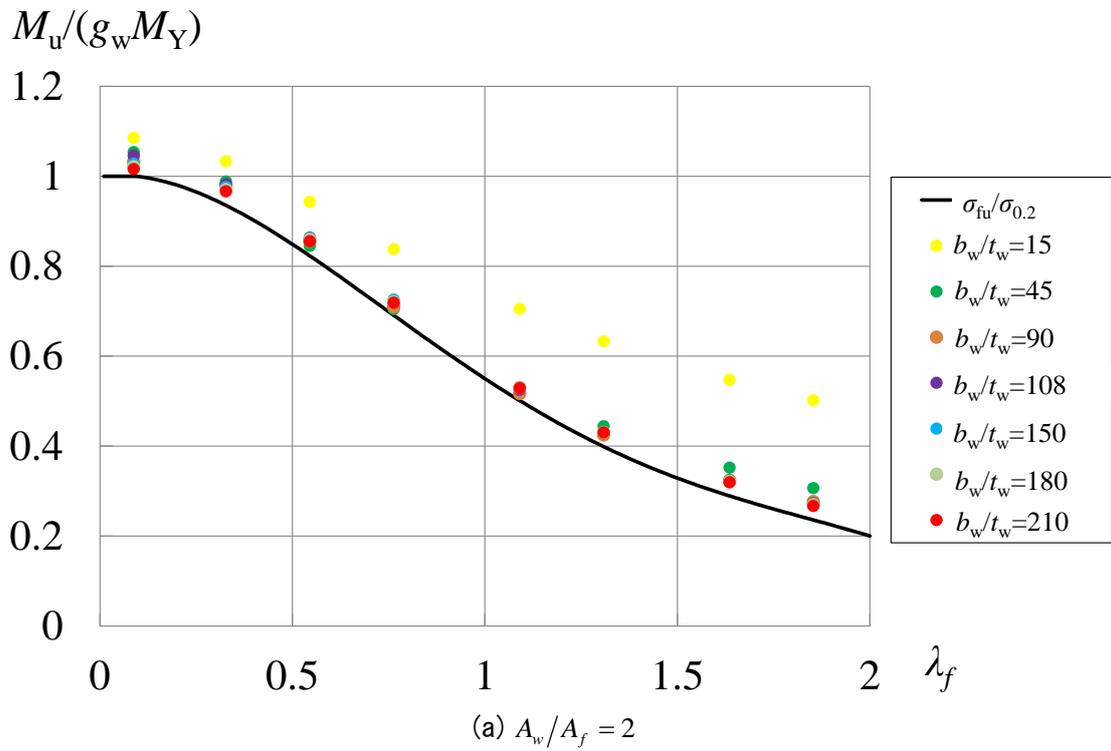


図-5.10 係数 K と断面積比 A_w/A_f の関係

耐荷力式(5.9)と，式(5.10)によってプロットされた解析値の比較を図-5.11 に示す．解析値は，耐荷力曲線より高い位置に分布している．図-5.11 の各図を一つにまとめた図を図-K.2 に示す．



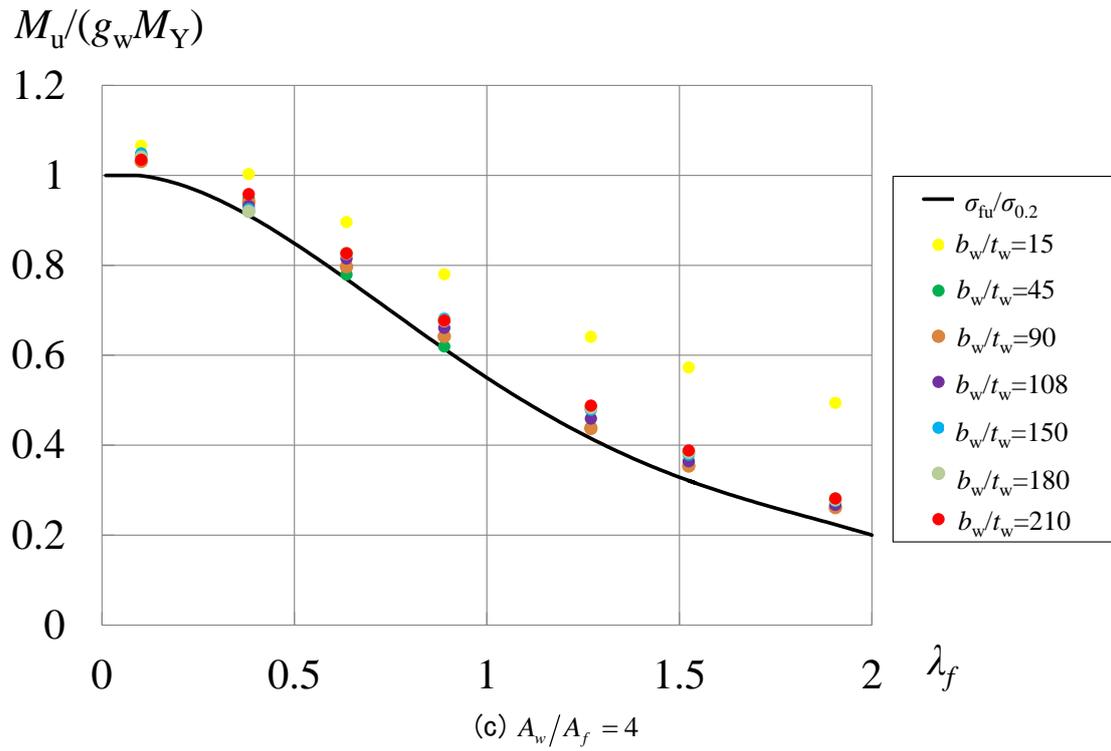


図-5.11 耐荷力式(5.9)と、式(5.10)によってプロットされた解析値の比較

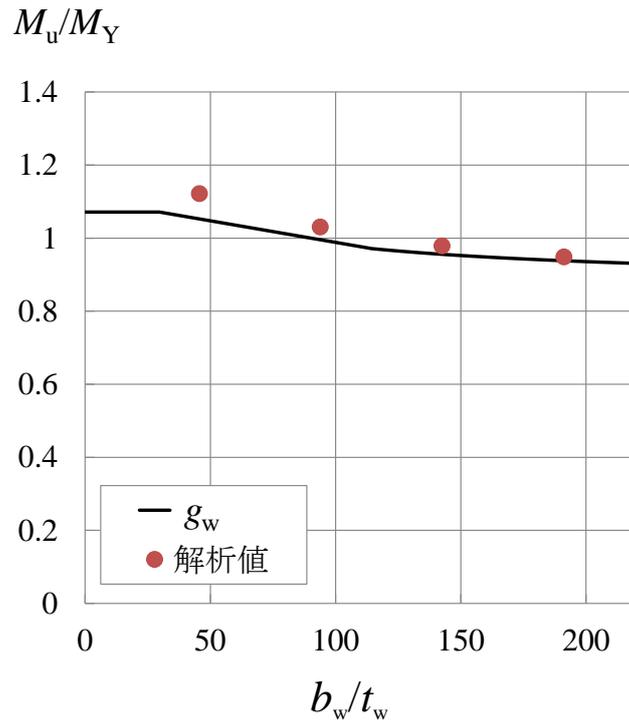
5.3.2 接合桁

フランジが水平方向に座屈しない場合に対して、耐荷力式(5.7)と解析値の比較を図-5.12を示す。 $\lambda_f = 0.08$ に対して計算が行われている。 λ_f は、式(5.12)が代入された式(5.10)によって算出された値である。FEM解析では、図-5.2に示す残留応力が考慮されている。桁の断面寸法と解析値の数値データをそれぞれ表-E.3, 付録Hに示す。図-5.12からわかるように、耐荷力曲線は解析値の幾分低い位置を通過している。耐荷力曲線には残留応力の影響が考慮されていないので、ウェブに存在する残留応力は桁の曲げ耐荷力に影響しないと言える。

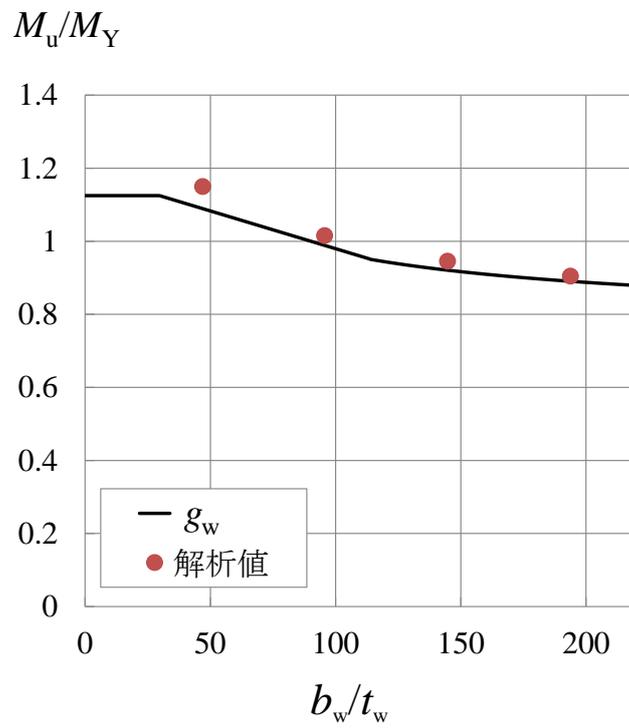
フランジに水平方向の座屈を許す場合に対して、耐荷力式(5.9)と、式(5.12)が代入された式(5.10)によってプロットされた解析値の比較を図-5.13に示す(図-5.13の各図を一つにまとめた図を図-K.3に示す)。解析値の数値データを付録Hに示す。同図から分かるように、非接合桁の耐荷力曲線を下回る解析値が存在する。したがって、フランジに存在する残留応力が桁の耐荷力を低下させる。さらに同図に示す接合桁の耐荷力曲線は、表-5.5に示す値が代入された式(4.6)が与えるフランジの耐荷力曲線である。

表-5.5 $\lambda_1, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$ の値

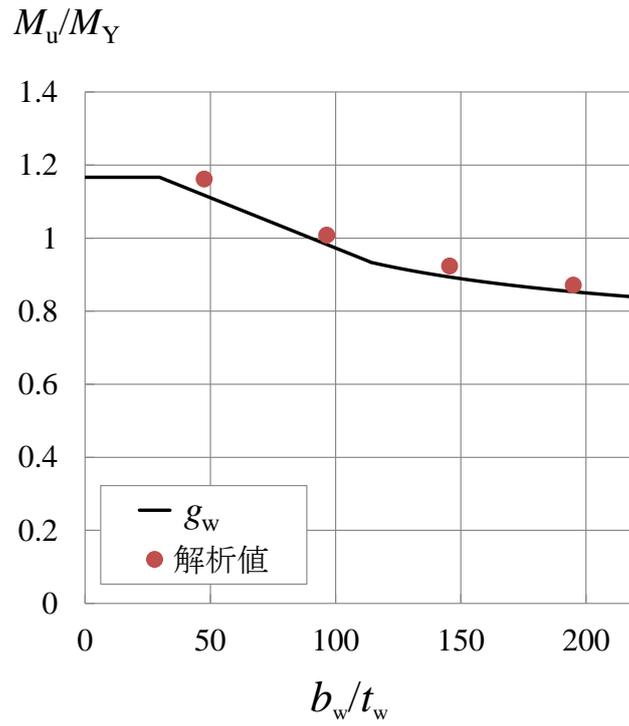
アルミニウム合金	λ_1	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
A5083-O (接合桁)	0.09	1.00	0.10	-1.33	0.88	-0.17



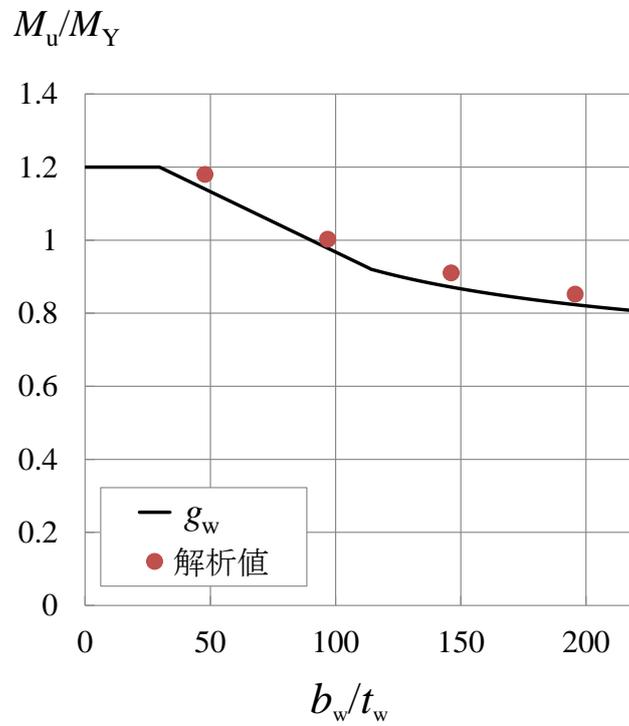
(a) $A_w/A_f = 1$



(b) $A_w/A_f = 2$



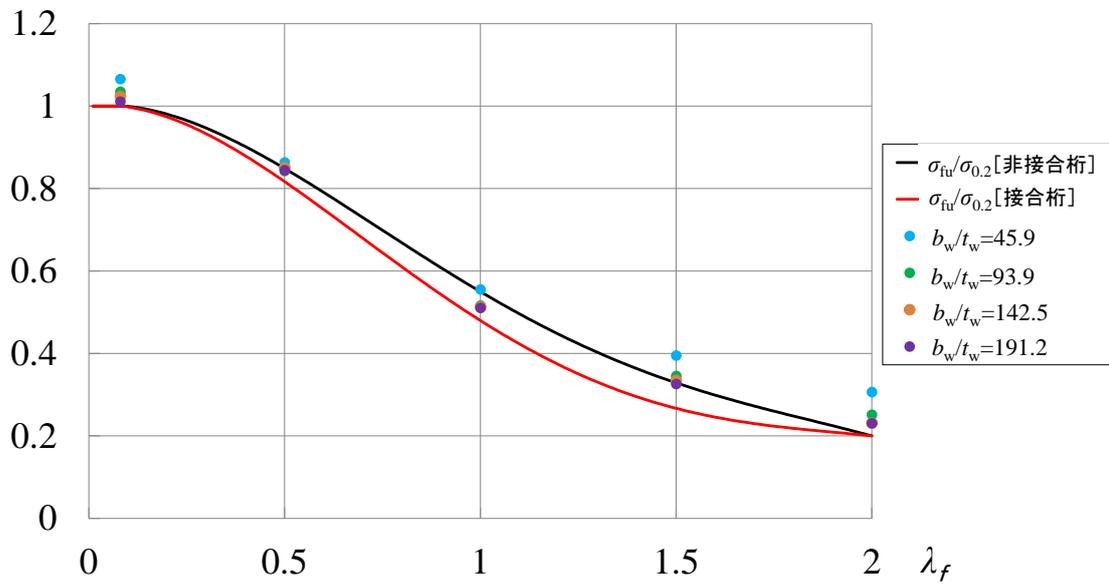
(c) $A_w/A_f = 3$



(d) $A_w/A_f = 4$

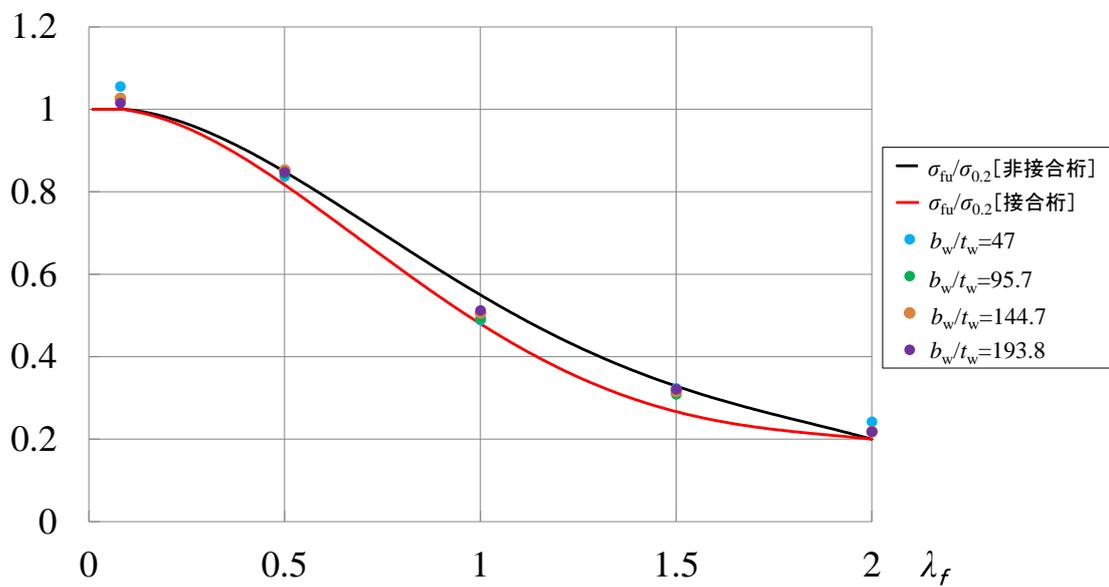
図-5.12 耐荷力式(5.7)と解析値の比較

$M_u/(g_w M_Y)$



(a) $A_w/A_f = 1$

$M_u/(g_w M_Y)$



(b) $A_w/A_f = 2$

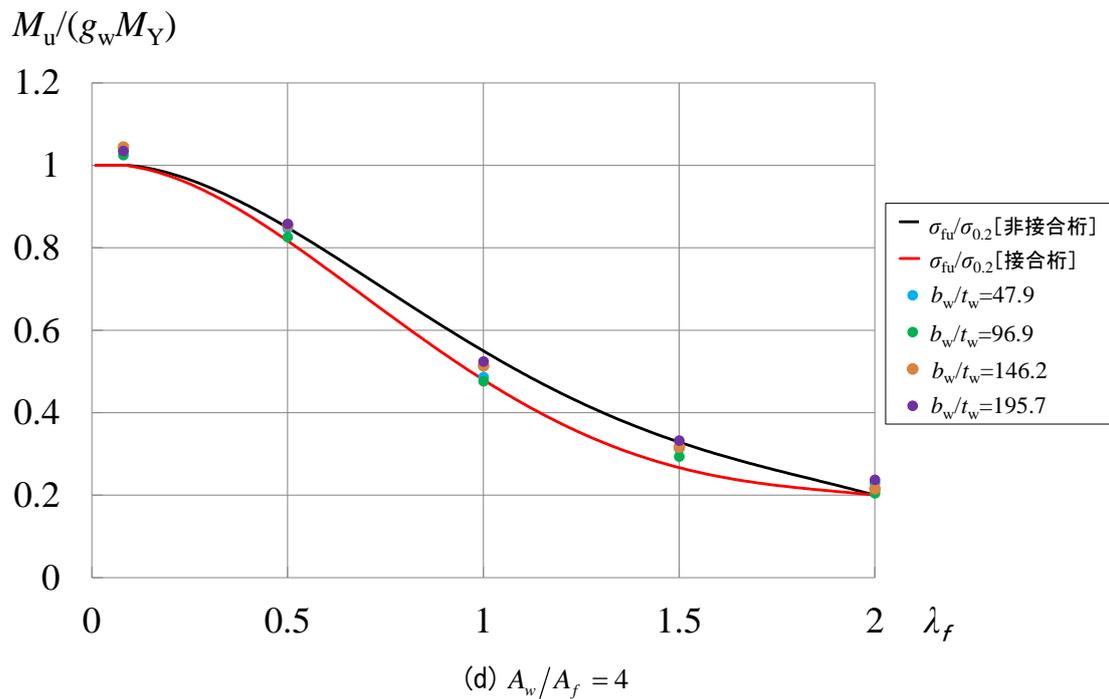
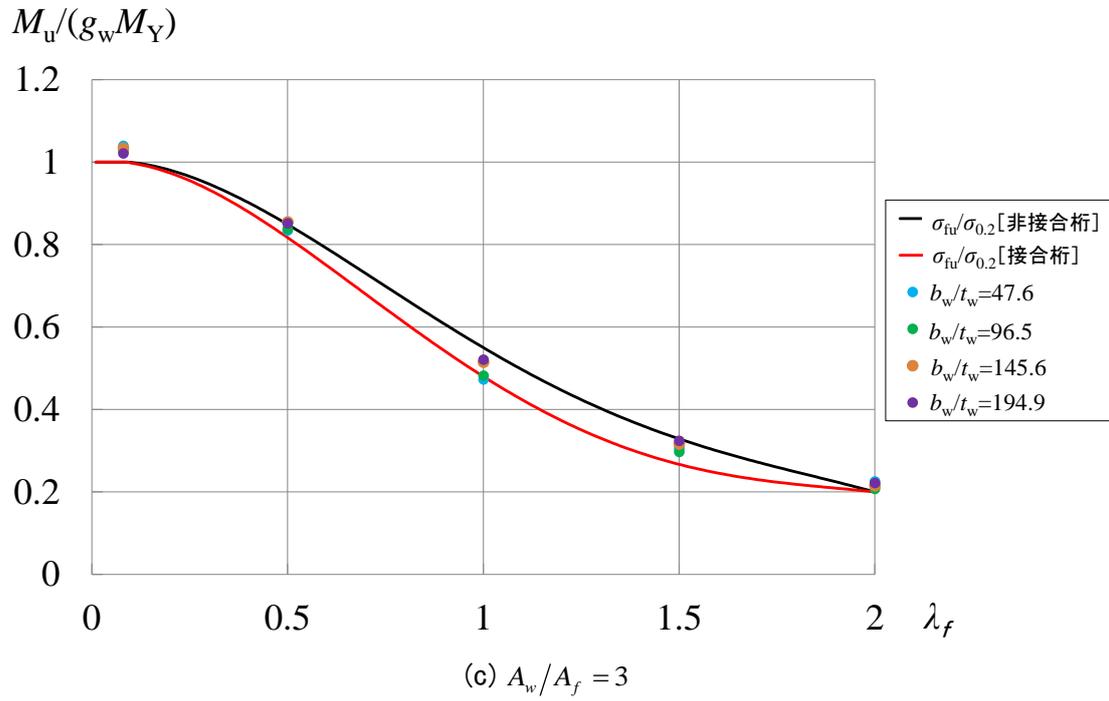


図-5.13 耐荷力式(5.9)と、式(5.12)が代入された式(5.10)によってプロットされた解析値の比較

5.4 係数 K の意味

係数 K の意味について考察する。ウェブが薄くて、桁が高い場合に対するフランジの水平座屈強度は、**図-5.14** に示す、圧縮フランジとウェブ高の 1/6 からなる T 型断面の柱の圧縮座屈強度として与えられる¹⁰⁾。この場合、**図-5.14** のハッチングが施された部分の鉛直軸回りの回転半径が次式で与えられる。

$$r = \frac{B_f}{\sqrt{4\left(3 + \frac{A_w}{2A_f}\right)}} \quad (5.13)$$

式(5.13)を式(4.3)に代入して次式を得る。

$$\lambda_f = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} K \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{B_f} \quad (5.14)$$

ここに、

$$K = \sqrt{1 + \frac{A_w}{6A_f}} \quad (5.15)$$

式(5.15)の K は、**図-5.14** においてハッチングが施されたウェブの断面積に起因する係数である。したがって、本研究で得られた係数 K は、圧縮を受けるフランジの水平耐荷力を算出する際に、ウェブを考慮しなかったことが原因であると考えられる。

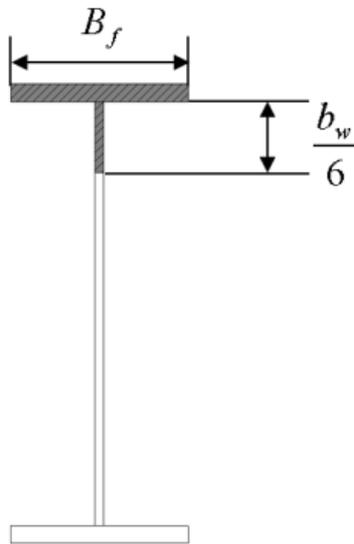


図-5.14 フランジの水平座屈に対する等価 T 型断面

$K-A_w/A_f$ 関係に対して、本研究で得られた式(5.11)および式(5.12)と式(5.15)の比較を**図-5.15** に示す。これらの式は、いずれも A_w/A_f が増加すると K も増加する傾向を示すが一

致しない。これは、式(5.11)および式(5.12)が与える $K-A_w/A_f$ 関係は耐荷力に関するものであり、式(5.15)が与える $K-A_w/A_f$ 関係は座屈強度に関するものであるからと考えられる。

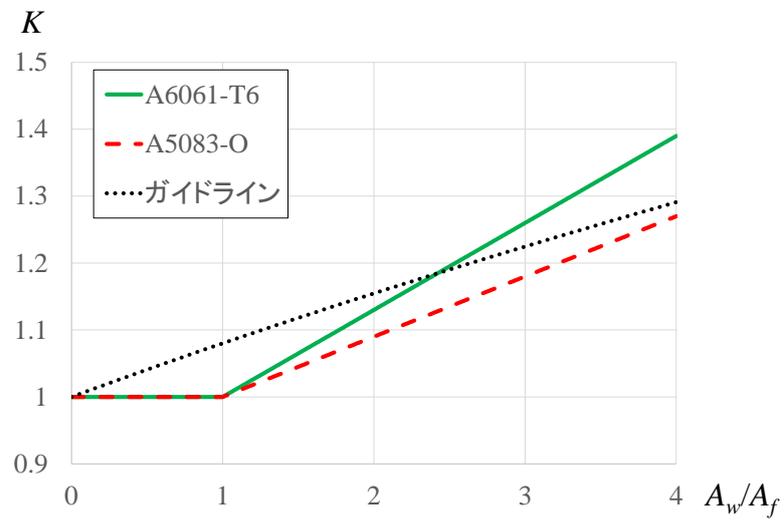


図-5.15 $K-A_w/A_f$ 関係の比較

5.5 耐荷力式の確認

5.5.1 増厚接合された A6061-T6 桁

増厚接合されたウェブを有する A6061-T6 桁の曲げ耐荷力の推定に耐荷力式(5.9)が適用できるか否かを確認する。解析対象は、ウェブの中央が増厚接合された中央増厚接合桁、ウェブの二か所が増厚接合された二か所増厚接合桁である。二か所増厚接合の接合位置は、ウェブの上下端部から $b_w/5$ とする。図-5.16 に示す残留応力をウェブに仮定する。

アルミニウム合金の応力-ひずみ関係に対して式(4.1)を用いる。A6061-T6 の接合部の 0.2% 耐力 $\sigma_{j0.2}$ を 105MPa、ひずみ硬化パラメータ n_j を 10 とする⁵⁾。

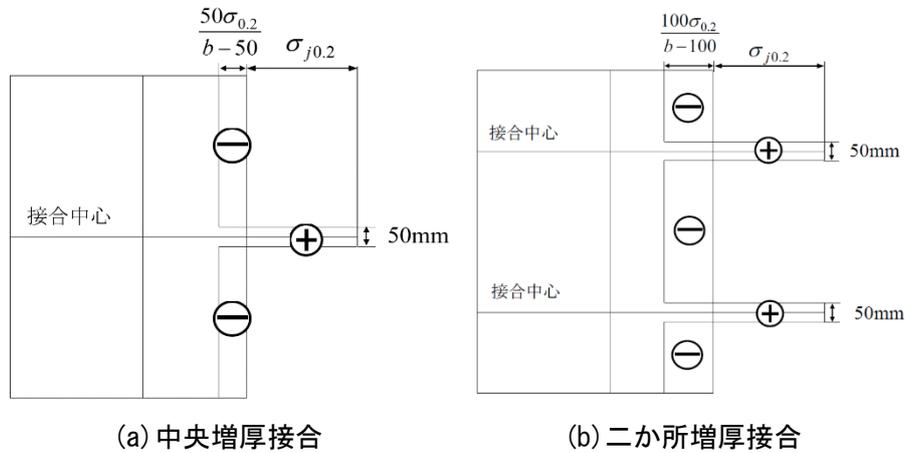
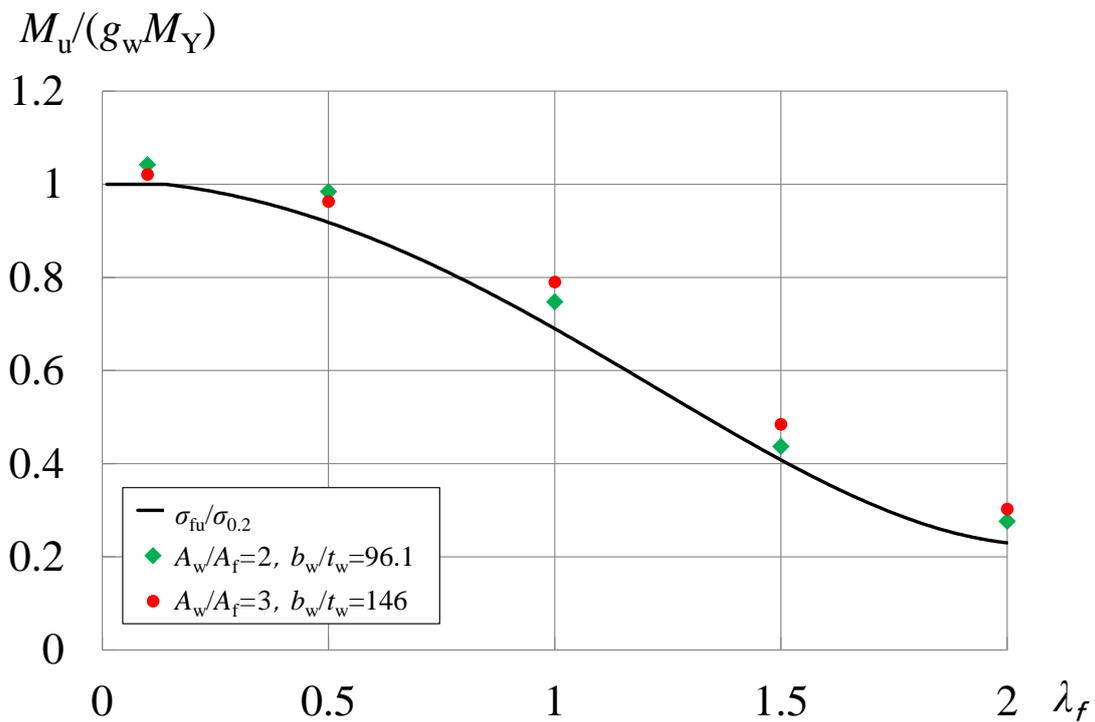
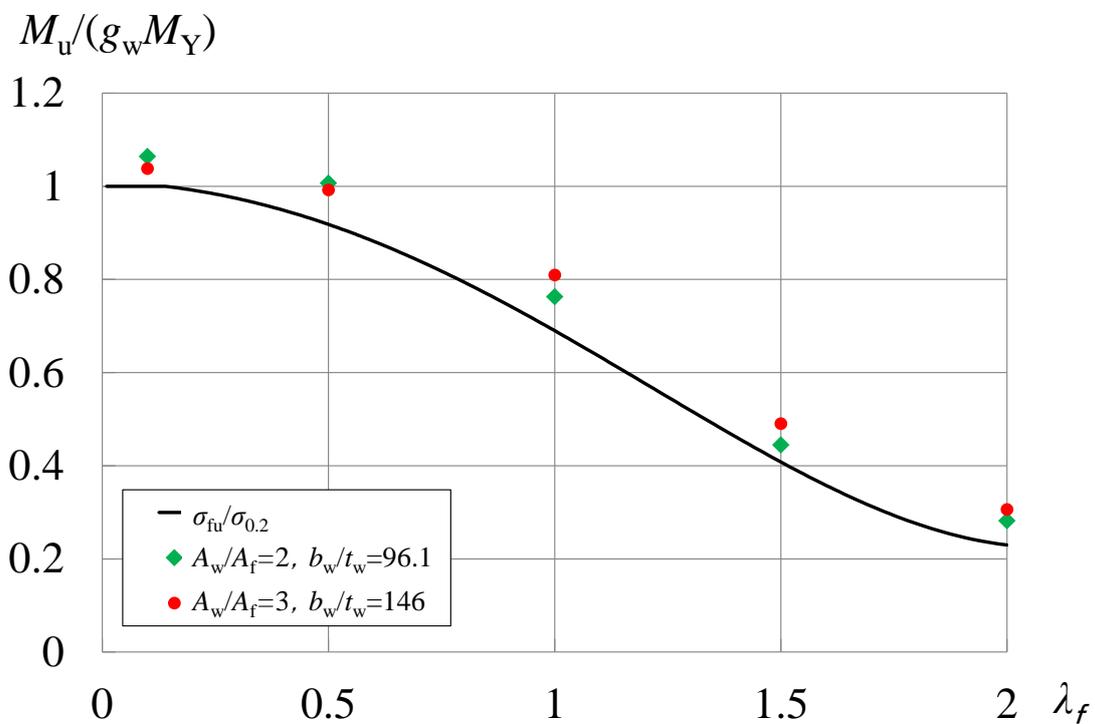


図-5.16 ウェブに仮定する残留応力

耐荷力式(5.9)と解析値の比較を図-5.17 に示す。断面寸法と解析値の数値データをそれぞれ表-E.4, 付録 I に示す。 λ_f は、式(5.11)が代入された式(5.10)によって算出された値である。同図より、耐荷力曲線は解析値の幾分低い位置を通っている。増厚接合されたウェブを有する A6061-T6 桁の曲げ耐荷力を耐荷力式(5.9)で推定できることが確認された。



(a) 中央増厚接合桁

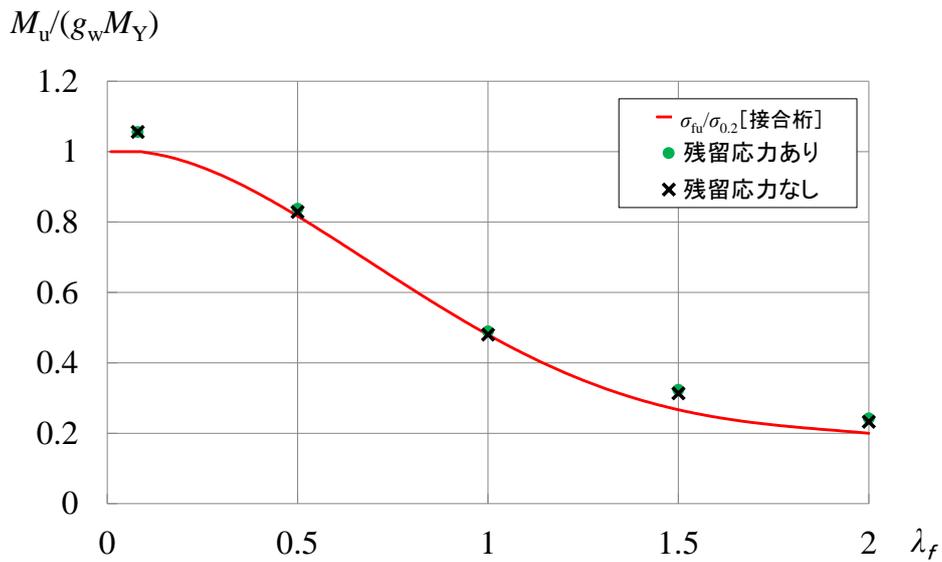


(b) 二ヶ所増厚接合桁

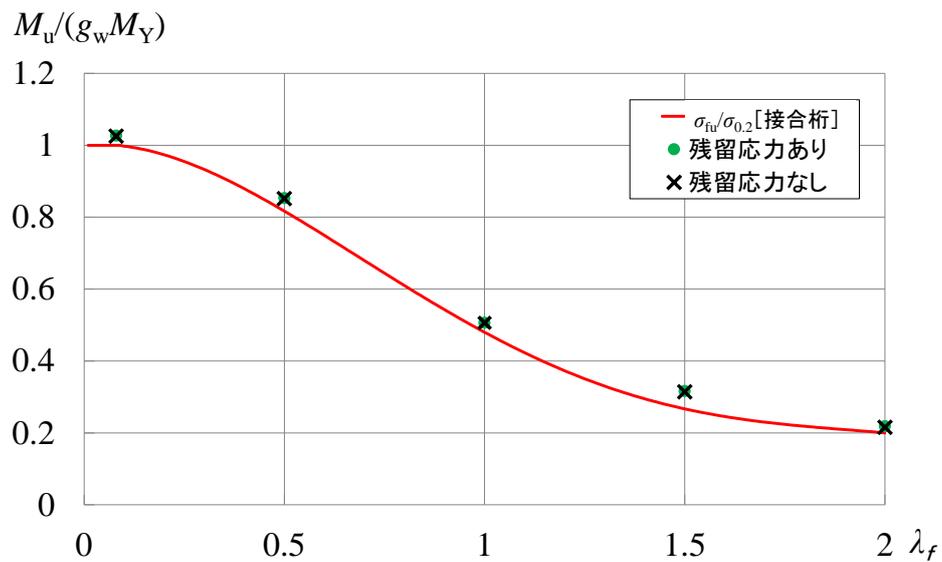
図-5.17 耐力式(5.9)と解析値の比較

5.5.2 A5083-O 桁におけるウェブの残留応力の影響

5.3.2 において、 $\lambda_f = 0.08$ に対して残留応力が A5083-O 桁の曲げ耐荷力に影響しないことが示された。本項では、 λ_f の他の値に対してもウェブの残留応力が桁の曲げ耐荷力に影響しないことを確認する。図-5.2 に示す残留応力において、ウェブの残留応力がある場合とない場合の解析値の比較を図-5.18 に示す。 λ_f は、式(5.12)が代入された式(5.10)によって算出された値である。解析値の数値データを付録 J に示す。同図より、ウェブの残留応力がある場合とない場合の解析値が同じである。 λ_f の他の値に対してもウェブの残留応力が桁の曲げ耐荷力に影響しないことが確認された。



(a) $A_w/A_f = 2, b_w/t_w = 47$



(b) $A_w/A_f = 2, b_w/t_w = 144.7$

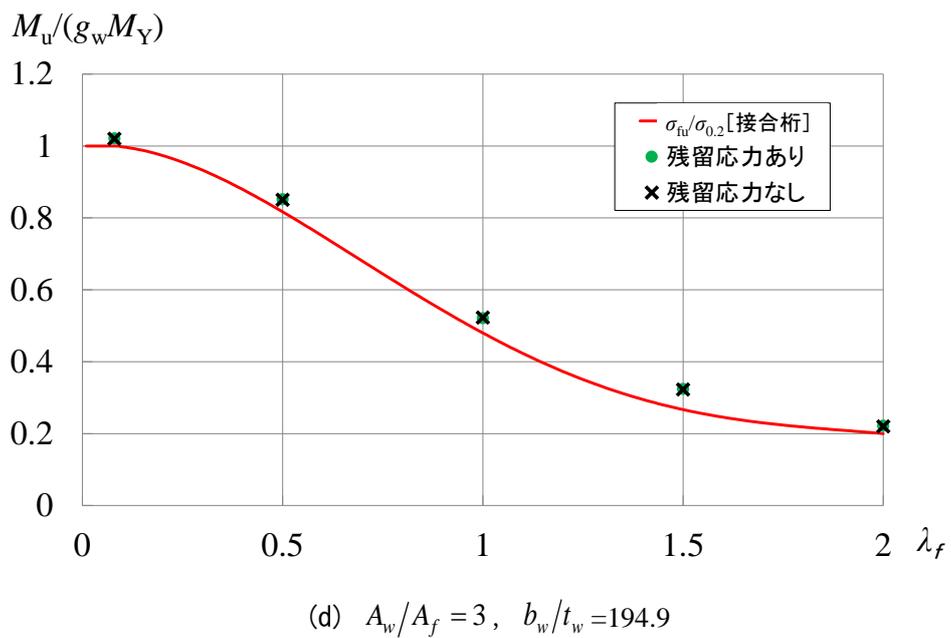
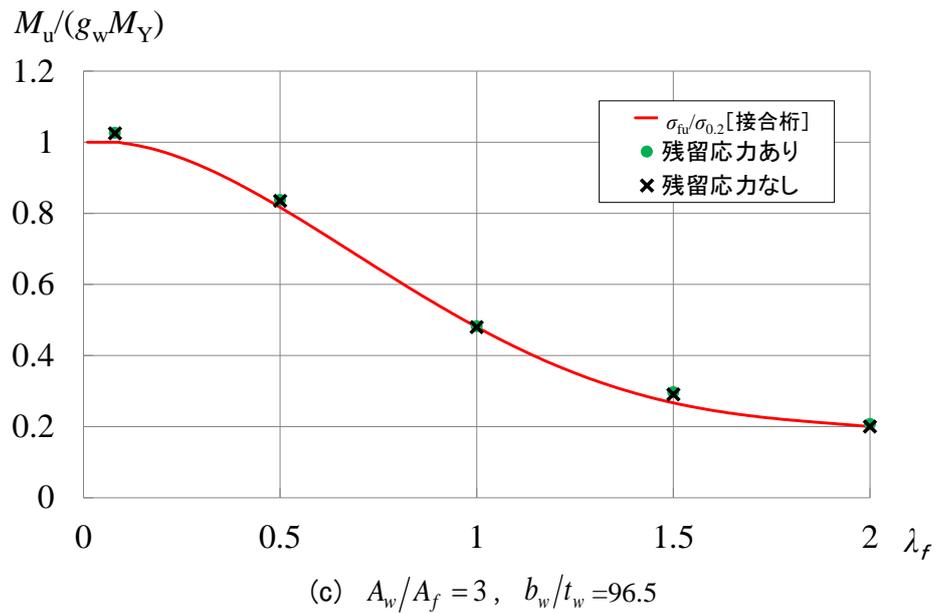


図-5.18 ウェブの残留応力の有無の影響

第 6 章 結論

本研究では、曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力式を誘導し、この式が与える桁の耐荷力と弾塑性有限変位解析によって得られた桁の耐荷力を比較し、同式の妥当性を調べた結果、曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力式として次式を得た。

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

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

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

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

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

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

ここに, 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
 $\sigma_{0.2}$: アルミニウム合金の 0.2% 耐力

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
$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, m$: 表 6. 1 に示す定数値
λ_f	: 細長比パラメータ
$\lambda_1, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$: 表 6. 2 に示す定数値
l	: 桁の長さ
B_f	: フランジの幅
E	: ヤング係数
K	: 係数
k_0, k_1	: 表 6. 3 に示す定数値

表 6. 1 $\sigma_{0.2}, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, m$ の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	β_0	β_1	β_2	β_3	m
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 6. 2 $\sigma_{0.2}, \lambda_1, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$ 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	非接合桁	245	0.13	1.01	-0.03	-0.30	-0.04	0.05
	増厚接合桁							
A5083-O	非接合桁	125	0.09	1.00	0.10	-1.13	0.72	-0.14
	接合桁							

表 6. 3 k_0, 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

上記の耐荷力式は、上下対称の I 型断面桁で、A6061-T6 に対しては、非接合桁およびウェブが増厚接合された桁、A5083-O に対しては、非接合桁およびウェブとフランジが隅肉溶接で接合された桁に適用できる。

参考文献

- 1) 鋼構造委員会：21 世紀の建築材料 アルミニウム合金の可能性，土木学会，平成 22 年度全国大会研究討論会，研-06 資料，2010.
- 2) アルミニウム橋研究会：蒲原ケミカル橋，<http://alst.jp/str/bridge/kanbara.htm>
- 3) 西森文子，大倉一郎：座屈強度と終局強度を考慮した突起付きアルミニウム合金板の断面形状，構造工学論文集，Vol.59A，pp.199-207，2013.
- 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) 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.
- 6) 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.
- 7) MSC.Software Corporation: Marc Mentat 2013.0.0.
- 8) 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-ひずみ関係の定式化および MIG 接合と摩擦攪拌接合によって発生する残留応力の定式化，ALST 研究レポート，No.1，2007.
- 9) 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.
- 10) 土木学会：座屈設計ガイドライン，改訂第 2 版 [2005 年版]，pp.110-111 と p.191，2005.
- 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) 大倉一郎，寺川勝大：面内せん断を受けるアルミニウム長方形板の耐荷力，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.69，No.3，pp.491-504，2013.

付録A 増厚接合された A6061-T6 板の曲げ耐荷力

A.1 解析対象

増厚接合された A6061-T6 板の圧縮耐荷力およびせん断耐荷力は，非接合板のそれぞれの耐荷力より高くなることが示されている^{11),12)}．しかし，曲げを受ける場合に対しては未だ明らかにされていない．そこで，本付録では，増厚接合された A6061-T6 板の曲げ耐荷力を明らかにする．

図-A.1 に示すように，A6061-T6 に対し中央増厚接合板，二か所増厚接合板を解析対象とする．二か所増厚接合板の接合箇所 c は，高さ b の板の端部より $c=b/4$ の位置とする．

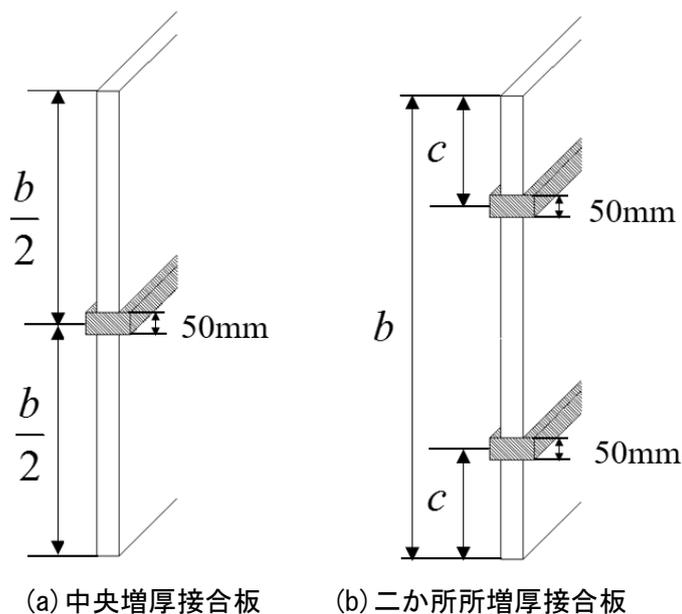


図-A.1 解析対象

A.2 FEM による弾塑性有限変位解析

アルミニウム合金の応力-ひずみ関係に対して式(4.1)を用いる．A6061-T6 の接合部の 0.2% 耐力 $\sigma_{j0.2}$ を 105MPa，ひずみ硬化パラメータ n_j の値を 10 とする．ひずみ硬化パラメータの値は，引張試験の結果に基づいて，非超過確率 5% に対する値である⁵⁾．

次式で与えられる初期たわみを仮定する．

$$w_0 = \frac{b}{250} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (\text{A.1})$$

ここに、 a : 面内曲げの作用方向の長方形板の長さ

b : 面内曲げの作用直角方向の長方形板の長さ

式(A.1)の最大初期たわみ $b_w/250$ は、JSCE 指針⁴⁾で規定される桁ウェブの製作精度に対応している。

図-A.2 に示す残留応力を仮定する⁵⁾。

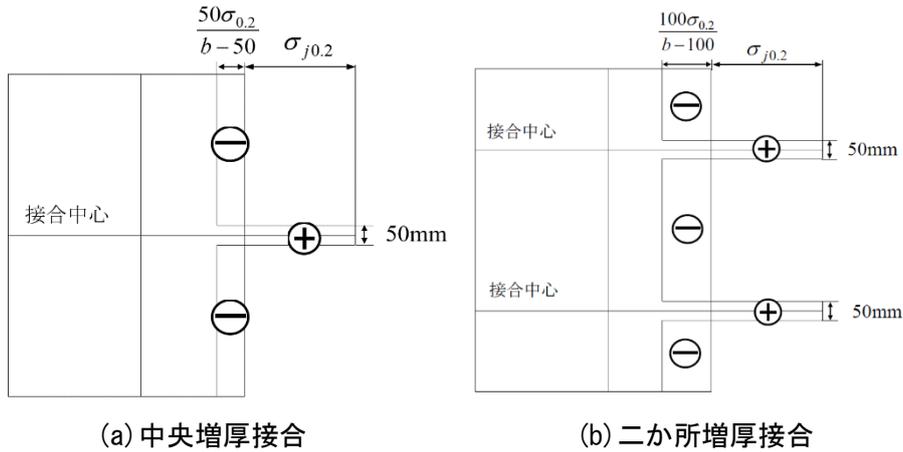


図-A.2 残留応力分布

面内曲げを受ける 4 辺単純支持された長方形板の弾塑性有限変位解析を汎用有限要素解析プログラム MARC⁷⁾を用いて行なう。要素分割を図-A.3 に示す。耐荷力が最も小さくなる縦横比を考慮して⁶⁾、 $a=400$ 、 $b=800$ とする。解析対象の対称性より長方形板の左側半分が要素分割されている。接合部の要素分割は、1 要素の辺長を 25mm とすれば十分な精度が得られることが明らかにされているので⁶⁾、中央増厚接合板および二か所増厚接合板の接合部は 2 要素で分割する。

原点の y 軸方向の変位を拘束する以外、非載荷辺の面内方向の変位は自由である。 $(0, b/2)$ の節点を中心として、 $x=0$ の辺を z 軸回りに強制回転させることにより長方形板に面内曲げを与える。これを実現させるために、 $x=0$ の辺に剛棒を設け、長方形板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。3 次元弾性梁要素の伸び剛性とねじり剛性をゼロ、曲げ剛性に大きな値を設定することにより、剛棒を実現する。さらに、 $(0, b/2)$ の節点と $x=0$ の辺上の各節点をタイイングし、 $(0, b/2)$ の節点の z 軸回りの回転角と $x=0$ の辺上の各節点の z 軸回りの回転角が同じになるようにする。

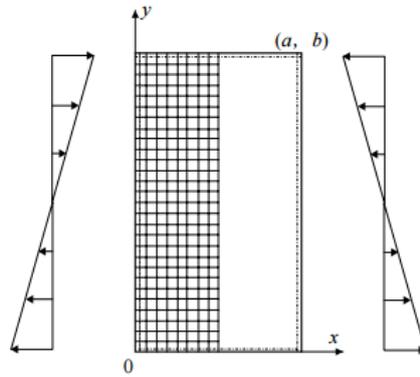


図-A.3 要素分割

A.3 耐荷力曲線と解析値の比較

次式に示すように，FEM 解析で得られる最大曲げモーメント M_u を長方形板の弾性断面係数 W で除して得られる σ_u を耐荷力と定義する．

$$\sigma_u = \frac{M_u}{W} \quad (\text{A.2})$$

- ここに、
 σ_u : 耐荷力
 M_u : 最大曲げモーメント
 $W = \frac{b^2 t}{6}$: 長方形板の弾性断面係数
 b : 長方形板の板幅
 t : 長方形板の板

長方形板の細長比パラメータは次式で定義される．

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2) \sigma_{0.2}}{23.9 E} \frac{b}{t}} \quad (\text{A.3})$$

- R : 幅厚比パラメータ
 μ : ポアソン比 (= 0.3)
 E : ヤング係数 (= 70 GPa)

面内曲げを受ける長方形板の耐荷力は式(3.13)で与えられ，同式の係数の値は表-3.1 に与えられている．

耐荷力式(3.13)と解析値の比較を図-A.4 に示す．耐荷力曲線は，解析値の下に位置する．したがって，増厚接合された A6061-T6 板の曲げ耐荷力も非接合板のそれより高くなる．

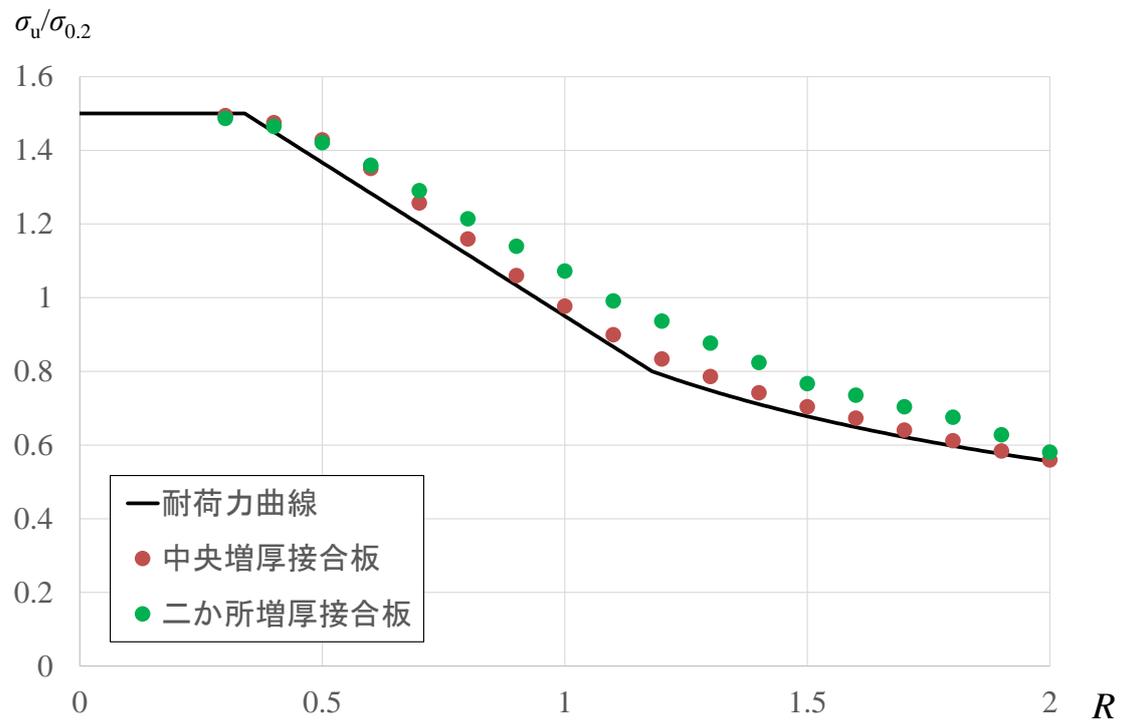


図-A.4 耐荷力式 (3.13) と解析値の比較

付録 B 端部接合された A5083-O 板の曲げ耐荷力

B.1 解析対象

図-B.1 に示す，端部接合された A5083-O 板の曲げ耐荷力は未だ明らかにされていないので，本付録ではそれを明らかにする．

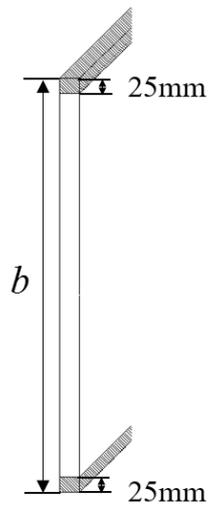


図-B.1 解析対象

B.2 FEM による弾塑性有限変位解析

アルミニウム合金の応力-ひずみ関係に対して式(4.1)を用いる．式(A.1)で与えられる初期たわみと図-B.2 に示す残留応力を仮定する⁵⁾．長方形板の大きさは $a=500\text{mm}$ ， $b=1000\text{mm}$ とする．

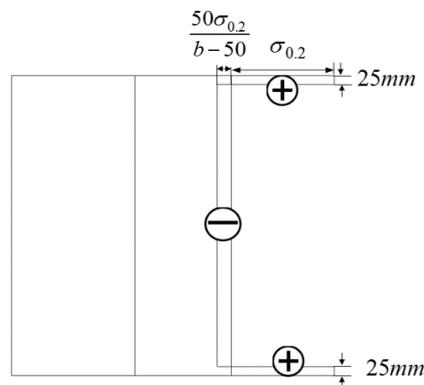


図-B.2 残留応力分布

B.3 耐荷力曲線と解析値の比較

耐荷力 σ_u は式(A.2)で定義され、長方形板の細長比パラメータは式(A.3)で定義される。面内曲げを受ける長方形板の耐荷力は式(3.13)で与えられ、同式の係数の値は表-3.1に与えられている。

耐荷力式(3.13)と解析値の比較を図-B.3に示す。解析値は耐荷力曲線の上にある。したがって、端部接合板に生じる残留応力は曲げ耐荷力に影響しない。

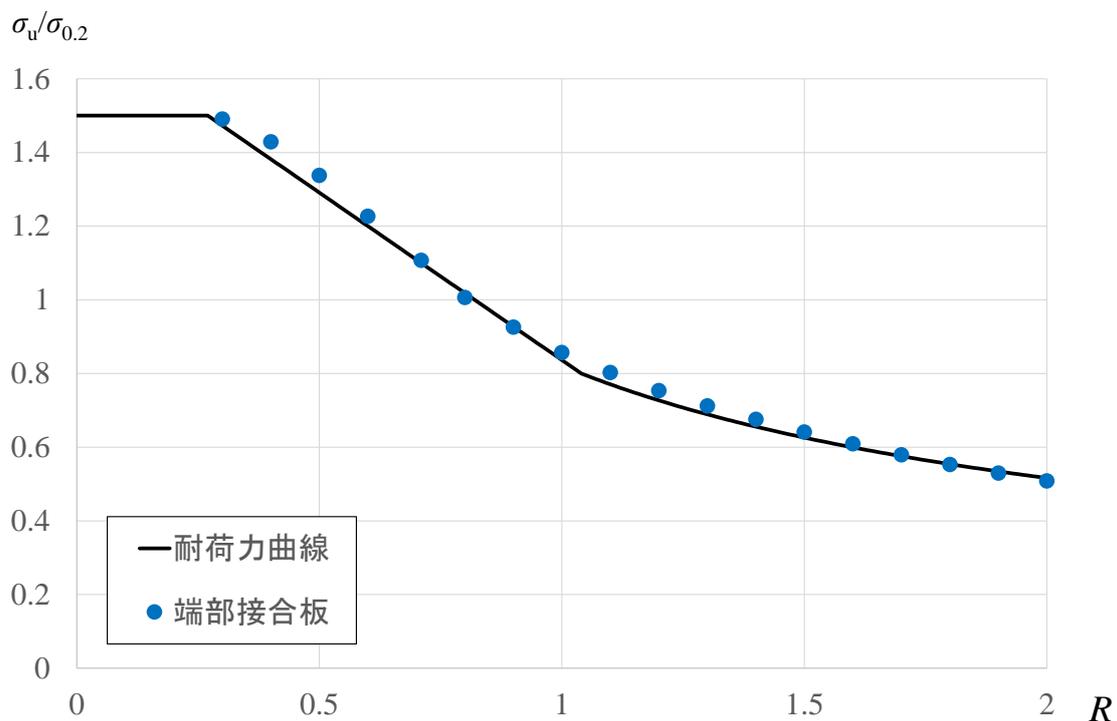


図-B.3 耐荷力式(3.13)と解析値の比較

付録 C FEM 解析の数値データ [図-4.5]

λ_f	$\sigma_{fu}/\sigma_{0.2}$	
	A6061-T6	A5083-O
0.1	1	0.999
0.2	0.99	0.986
0.3	0.971	0.96
0.4	0.948	0.911
0.5	0.923	0.851
0.6	0.894	0.787
0.7	0.863	0.721
0.8	0.825	0.657
0.9	0.778	0.598
1.0	0.718	0.544
1.1	0.649	0.494
1.2	0.578	0.449
1.3	0.511	0.408
1.4	0.452	0.369
1.5	0.400	0.335
1.6	0.357	0.304
1.7	0.319	0.276
1.8	0.287	0.252
1.9	0.259	0.230
2.0	0.235	0.210

付録 D 長方形板の要素分割数

長方形板の耐荷力と要素分割数の関係を表-D.1 に示す。これは、アルミニウム合金が A6061-T6 で、 $a=400\text{mm}$ 、 $b=800\text{mm}$ 、 $t=10.18\text{mm}$ の長方形板の左側半分を、要素の形状が正方形で、 2×8 、 4×16 、 8×32 で要素分割して得られる結果である。ここで、 2×8 の 2 と 8 は、それぞれ長さ方向と高さ方向の要素分割数である。桁のウェブの要素分割数は 4×16 で十分であると言える。

表-D.1 長方形板の曲げ耐荷力と要素分割数の関係

要素分割	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
2×8	0.9376
4×16	0.9337
8×32	0.9332

付録 E 桁の断面寸法

表-E.1 A6061-T6

(a) $A_w/A_f = 1$

b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)
15	10	150	10.7	64.6
45	10	450	19.0	113.7
72	10	720	24.1	144.5
90	10	900	27.0	161.8
120	10	1200	31.2	187.2
150	10	1500	34.9	209.6

(b) $A_w/A_f = 2$

b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)
15	10	150	7.5	45
45	10	450	13.3	80.0
72	10	720	16.9	101.5
90	10	900	19.0	113.7
120	10	1200	21.9	131.7
150	10	1500	24.6	147.5

(c) $A_w/A_f = 3$

b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)
15	10	150	6.1	36.3
45	10	450	10.8	64.6
72	10	720	13.7	82.4
90	10	900	15.4	92.4
120	10	1200	17.8	107.1
150	10	1500	20	120

(d) $A_w/A_f = 4$

b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)
15	10	150	5.2	31.1
45	10	450	9.3	55.6
72	10	720	11.8	71
90	10	900	13.3	79.7
120	10	1200	15.4	92.4
150	10	1500	17.3	103.6

表-E.2 A5083-0 [非接合桁]

(a) $A_w/A_f = 1$

b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)
15	10	150	11.8	58.8
45	10	450	20.7	103.6
90	10	900	29.5	147.5
108	10	1080	32.4	161.8
150	10	1500	38.2	191.2
180	10	1800	41.9	209.6
210	10	2100	45.3	226.6

(b) $A_w/A_f = 2$

b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)
15	10	150	8.2	40.9
45	10	450	14.5	72.5
90	10	900	20.7	103.6
108	10	1080	22.7	113.7
150	10	1500	26.9	134.5
180	10	1800	29.5	147.5
210	10	2100	31.9	159.5

(c) $A_w/A_f = 3$

b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)
15	10	150	6.6	32.9
45	10	450	13.7	68.3
90	10	900	16.8	84.1
108	10	1080	18.5	92.4
150	10	1500	21.9	109.3
180	10	1800	24	120
210	10	2100	26	129.8

(d) $A_w/A_f = 4$

b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)
15	10	150	6.6	32.9
45	10	450	13.7	68.3
90	10	900	16.8	84.1
108	10	1080	18.5	92.4
150	10	1500	21.9	109.3
180	10	1800	24	120
210	10	2100	26	129.8

表-E.3 A5083-0 [接合桁]

(a) $A_w/A_f = 1$

b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)
45.7	10.5	478.1	21.9	109.5
93.9	10.3	968.9	31.1	155.5
142.5	10.3	1461.8	38.2	191
191.2	10.2	1955.8	44.2	221

(b) $A_w/A_f = 2$

b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)
47	10.3	484.7	15.3	76.5
95.7	10.2	978.1	21.9	109.5
144.7	10.2	1473.1	26.9	134.5
193.8	10.2	1968.9	31.1	155.5

(c) $A_w/A_f = 3$

b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)
47.6	10.3	487.6	12.4	62
96.5	10.2	982.2	17.8	89
145.6	10.2	1478.1	21.9	109.5
194.9	10.1	1974.7	25.3	126.5

(d) $A_w/A_f = 4$

b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)
47.9	10.2	489.3	10.7	53.5
96.9	10.2	984.7	15.3	76.5
146.2	10.1	1481.1	18.9	94.5
195.7	10.1	1978.1	21.9	109.5

表-E.4 A6061-T6 [増厚接合桁]

A_w/A_f	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)
2	96.1	10.2	980	10	120
3	146	10.14	1480	20	120

付録F FEM解析の数値データ [図-5.4 と 5.5]

(a) $A_w/A_f = 1$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$					
	$b_w/t_w=15$	$b_w/t_w=45$	$b_w/t_w=72$	$b_w/t_w=90$	$b_w/t_w=120$	$b_w/t_w=150$
0.1	1.088	1.057	1.044	1.041	1.026	1.013
0.3	1.054	1.022	1.024	1.024	1.011	1.001
0.5	0.997	0.953	0.959	0.968	0.958	0.949
0.7	0.935	0.872	0.878	0.890	0.885	0.878
1.0	0.840	0.716	0.71	0.714	0.708	0.704
1.2	0.768	0.598	0.576	0.574	0.565	0.559
1.5	0.652	0.450	0.420	0.414	0.403	0.396
1.7	0.582	0.381	0.344	0.335	0.332	0.324

(b) $A_w/A_f = 2$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$					
	$b_w/t_w=15$	$b_w/t_w=45$	$b_w/t_w=72$	$b_w/t_w=90$	$b_w/t_w=120$	$b_w/t_w=150$
0.1	1.067	1.042	1.028	1.038	1.027	1.021
0.3	1.036	1.000	1.001	1.013	1.005	0.995
0.5	0.948	0.913	0.935	0.953	0.947	0.941
0.7	0.864	0.81	0.837	0.862	0.863	0.864
1.0	0.74	0.624	0.633	0.651	0.657	0.664
1.2	0.65	0.481	0.496	0.509	0.513	0.516
1.5	0.526	0.359	0.352	0.358	0.359	0.360
1.7	0.462	0.300	0.289	0.293	0.292	0.293
2.0	0.389	0.239	0.227	0.228	0.225	0.224

(c) $A_w/A_f = 3$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$					
	$b_w/t_w=15$	$b_w/t_w=45$	$b_w/t_w=72$	$b_w/t_w=90$	$b_w/t_w=120$	$b_w/t_w=150$
0.1	1.071	1.031	1.02	1.037	1.032	1.027
0.3	1.02	0.977	0.989	0.999	0.991	0.968
0.5	0.926	0.878	0.915	0.926	0.925	0.923
0.7	0.827	0.762	0.793	0.825	0.837	0.828
1.0	0.692	0.557	0.574	0.599	0.612	0.622
1.2	0.627	0.435	0.441	0.459	0.470	0.480
1.5	0.482	0.313	0.310	0.322	0.328	0.333
1.7	0.423	0.260	0.255	0.263	0.267	0.270
2.0	0.357	0.207	0.199	0.205	0.206	0.207

(d) $A_w/A_f = 4$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$					
	$b_w/t_w=15$	$b_w/t_w=45$	$b_w/t_w=72$	$b_w/t_w=90$	$b_w/t_w=120$	$b_w/t_w=150$
0.1	1.062	1.025	1.018	1.043	1.042	1.037
0.3	1.005	0.96	0.965	0.993	0.952	0.947
0.5	0.904	0.849	0.873	0.901	0.906	0.908
0.7	0.794	0.721	0.757	0.795	0.797	0.8
1.0	0.654	0.508	0.525	0.552	0.57	0.587
1.2	0.564	0.393	0.400	0.421	0.437	0.436
1.5	0.457	0.282	0.281	0.295	0.304	0.31
1.7	0.399	0.235	0.231	0.242	0.248	0.252
2.0	0.291	0.188	0.182	0.189	0.192	0.195

付録 G FEM 解析の数値データ [図-5.8 と 5.9]

(a) $A_w/A_f = 1$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$						
	$b_w/t_w=15$	$b_w/t_w=45$	$b_w/t_w=90$	$b_w/t_w=108$	$b_w/t_w=150$	$b_w/t_w=180$	$b_w/t_w=210$
0.08	1.101	1.063	1.043	1.04	1.025	1.017	1.011
0.3	1.064	1.012	0.996	0.996	0.988	0.981	0.982
0.5	0.997	0.893	0.882	0.883	0.876	0.87	0.888
0.7	0.911	0.775	0.748	0.749	0.741	0.736	0.768
1.0	0.794	0.616	0.574	0.57	0.561	0.555	0.589
1.2	0.727	0.535	0.488	0.479	0.467	0.462	0.493
1.5	0.643	0.443	0.385	0.377	0.36	0.358	0.381
1.7	0.597	0.395	0.335	0.326	0.312	0.306	0.324
2.0	0.54	0.339	0.279	0.269	0.25	0.247	0.259

(b) $A_w/A_f = 2$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$						
	$b_w/t_w=15$	$b_w/t_w=45$	$b_w/t_w=90$	$b_w/t_w=108$	$b_w/t_w=150$	$b_w/t_w=180$	$b_w/t_w=210$
0.08	1.086	1.054	1.032	1.046	1.028	1.022	1.016
0.3	1.034	0.989	0.98	0.982	0.977	0.971	0.967
0.5	0.944	0.845	0.856	0.864	0.863	0.86	0.856
0.7	0.838	0.705	0.71	0.719	0.726	0.721	0.719
1.0	0.705	0.532	0.517	0.525	0.531	0.53	0.529
1.2	0.633	0.444	0.425	0.429	0.432	0.431	0.431
1.5	0.547	0.352	0.324	0.324	0.324	0.321	0.32
1.7	0.502	0.307	0.277	0.273	0.271	0.27	0.267
2.0	0.445	0.256	0.224	0.219	0.214	0.214	0.208

(c) $A_w/A_f = 3$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$						
	$b_w/t_w=15$	$b_w/t_w=45$	$b_w/t_w=90$	$b_w/t_w=108$	$b_w/t_w=150$	$b_w/t_w=180$	$b_w/t_w=210$
0.08	1.078	1.048	1.029	1.041	1.038	1.03	1.025
0.3	1.018	0.972	0.958	0.971	0.971	0.945	0.964
0.5	0.914	0.813	0.828	0.845	0.847	0.844	0.843
0.7	0.805	0.66	0.673	0.695	0.705	0.705	0.705
1.0	0.669	0.479	0.477	0.492	0.503	0.506	0.508
1.2	0.597	0.397	0.384	0.394	0.404	0.406	0.409
1.5	0.51	0.309	0.286	0.292	0.298	0.297	0.3
1.7	0.466	0.267	0.241	0.245	0.247	0.247	0.248
2.0	0.414	0.221	0.193	0.194	0.195	0.193	0.195

(d) $A_w/A_f = 4$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$						
	$b_w/t_w=15$	$b_w/t_w=45$	$b_w/t_w=90$	$b_w/t_w=108$	$b_w/t_w=150$	$b_w/t_w=180$	$b_w/t_w=210$
0.08	1.066	1.037	1.031	1.046	1.049	1.041	1.035
0.3	1.003	0.949	0.94	0.932	0.925	0.92	0.958
0.5	0.896	0.779	0.797	0.815	0.827	0.827	0.827
0.7	0.78	0.62	0.642	0.661	0.681	0.677	0.677
1.0	0.641	0.44	0.438	0.459	0.479	0.484	0.488
1.2	0.573	0.361	0.354	0.364	0.379	0.384	0.388
1.5	0.494	0.281	0.261	0.267	0.276	0.279	0.281
1.7	0.448	0.243	0.218	0.223	0.23	0.23	0.232
2.0	0.395	0.199	0.174	0.177	0.18	0.179	0.181

付録 H FEM 解析の数値データ [図-5.12 と 5.13]

(a) $A_w/A_f = 1$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$			
	$b_w/t_w = 45.7$	$b_w/t_w = 93.9$	$b_w/t_w = 142.5$	$b_w/t_w = 191.2$
0.08	1.066	1.035	1.024	1.011
0.5	0.864	0.843	0.852	0.845
1.0	0.555	0.516	0.513	0.511
1.5	0.395	0.346	0.335	0.326
2.0	0.307	0.251	0.231	0.231

(b) $A_w/A_f = 2$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$			
	$b_w/t_w = 47$	$b_w/t_w = 95.7$	$b_w/t_w = 144.7$	$b_w/t_w = 193.8$
0.08	1.056	1.027	1.026	1.015
0.5	0.837	0.844	0.853	0.848
1.0	0.489	0.493	0.506	0.512
1.5	0.323	0.309	0.316	0.321
2.0	0.242	0.219	0.219	0.218

(c) $A_w/A_f = 3$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$			
	$b_w/t_w = 47.6$	$b_w/t_w = 96.5$	$b_w/t_w = 145.6$	$b_w/t_w = 194.9$
0.08	1.04	1.026	1.034	1.021
0.5	0.834	0.838	0.855	0.852
1.0	0.473	0.482	0.515	0.521
1.5	0.305	0.297	0.316	0.324
2.0	0.225	0.207	0.215	0.222

(d) $A_w/A_f = 4$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$			
	$b_w/t_w = 47.9$	$b_w/t_w = 96.9$	$b_w/t_w = 146.2$	$b_w/t_w = 195.7$
0.08	1.035	1.025	1.044	1.035
0.5	0.848	0.826	0.855	0.858
1.0	0.487	0.476	0.514	0.524
1.5	0.313	0.294	0.317	0.332
2.0	0.229	0.205	0.216	0.237

注記： λ_f は、式(5.12)が代入された式(5.10)によって算出された値である。

付録 I FEM 解析の数値データ [図-5.17]

(a) 中央増厚接合

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$	
	$A_w/A_f = 2$ $b_w/t_w = 96.1$	$A_w/A_f = 3$ $b_w/t_w = 146$
0.1	1.042	1.021
0.5	0.984	0.963
1.0	0.747	0.790
1.5	0.437	0.484
2.0	0.276	0.303

(b) 二か所増厚接合

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$	
	$A_w/A_f = 2$ $b_w/t_w = 96.1$	$A_w/A_f = 3$ $b_w/t_w = 146$
0.1	1.064	1.038
0.5	1.007	0.992
1.0	0.763	0.809
1.5	0.445	0.490
2.0	0.282	0.306

注記： λ_f は、式(5.11)が代入された式(5.10)によって算出された値である。

付録 J FEM 解析の数値データ [図-5.18]

(a) $A_w/A_f = 2, b_w/t_w = 47$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$	
	ウェブ・フランジ	フランジのみ
0.08	1.056	1.055
0.5	0.837	0.828
1.0	0.489	0.480
1.5	0.323	0.313
2.0	0.242	0.233

(b) $A_w/A_f = 2, b_w/t_w = 144.7$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$	
	ウェブ・フランジ	フランジのみ
0.08	1.026	1.025
0.5	0.853	0.852
1.0	0.506	0.507
1.5	0.316	0.314
2.0	0.219	0.215

(c) $A_w/A_f = 3, b_w/t_w = 96.5$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$	
	ウェブ・フランジ	フランジのみ
0.08	1.026	1.025
0.5	0.837	0.835
1.0	0.482	0.480
1.5	0.297	0.291
2.0	0.207	0.200

(d) $A_w/A_f = 3, b_w/t_w = 194.9$

λ_f	$M_u/(g_w M_Y)$	
	ウェブ・フランジ	フランジのみ
0.08	1.021	1.020
0.5	0.852	0.850
1.0	0.521	0.523
1.5	0.324	0.323
2.0	0.222	0.220

注記： λ_f は、式(5.12)が代入された式(5.10)によって算出された値である。

付録 K 耐荷力曲線と解析値の比較

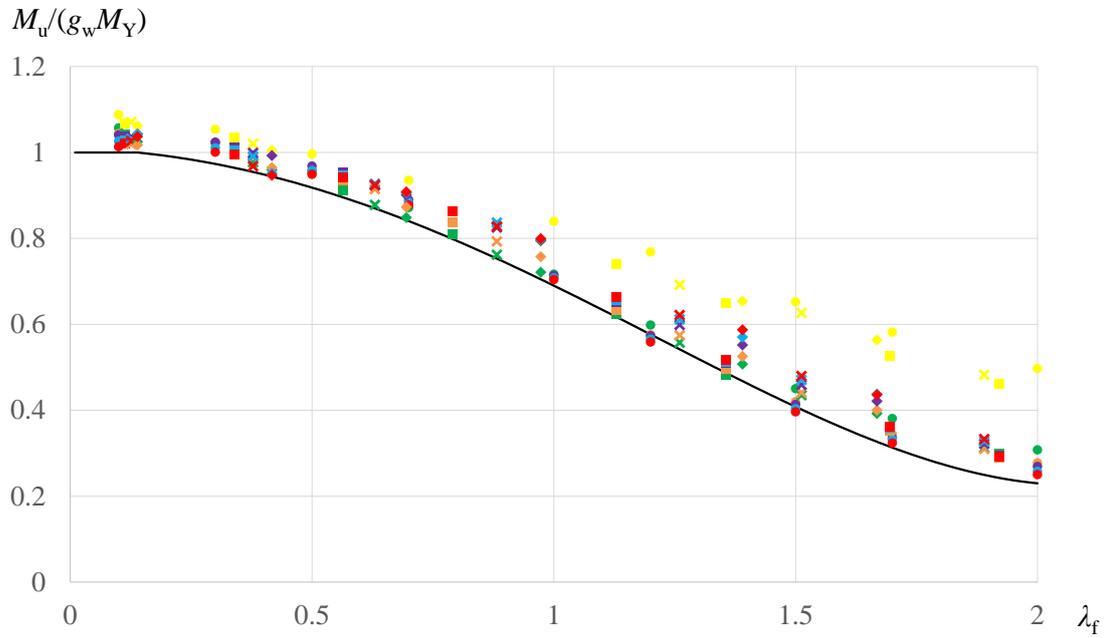


図-K.1 耐荷力式(5.9)と、式(5.10)によってプロットされた解析値の比較 [図-5.7]

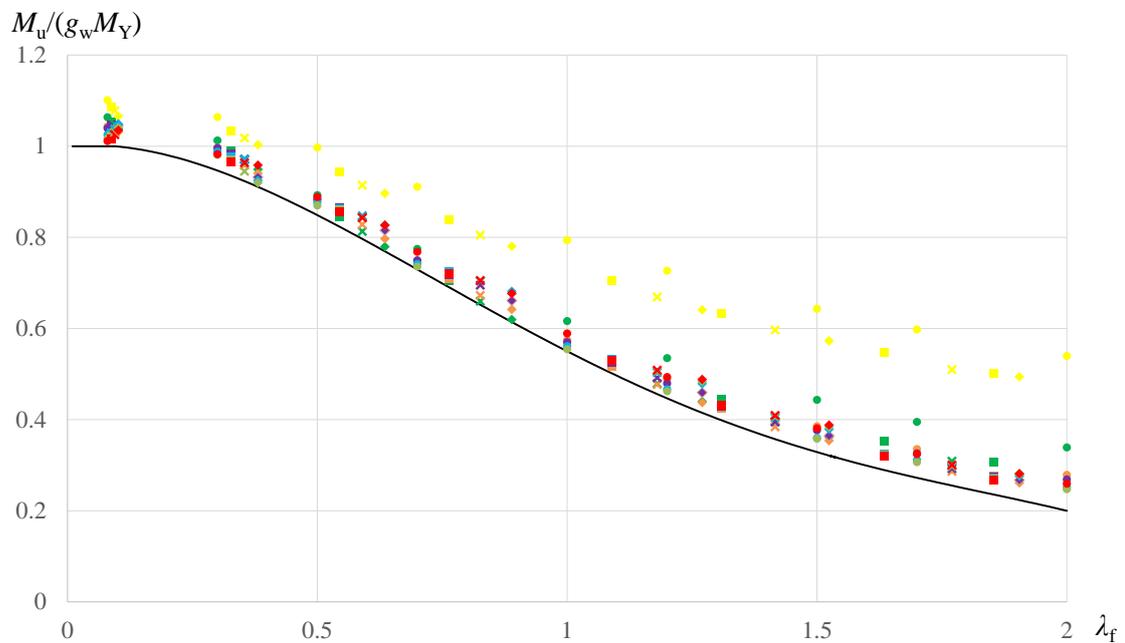


図-K.2 耐荷力式(5.9)と、式(5.10)によってプロットされた解析値の比較 [図-5.11]

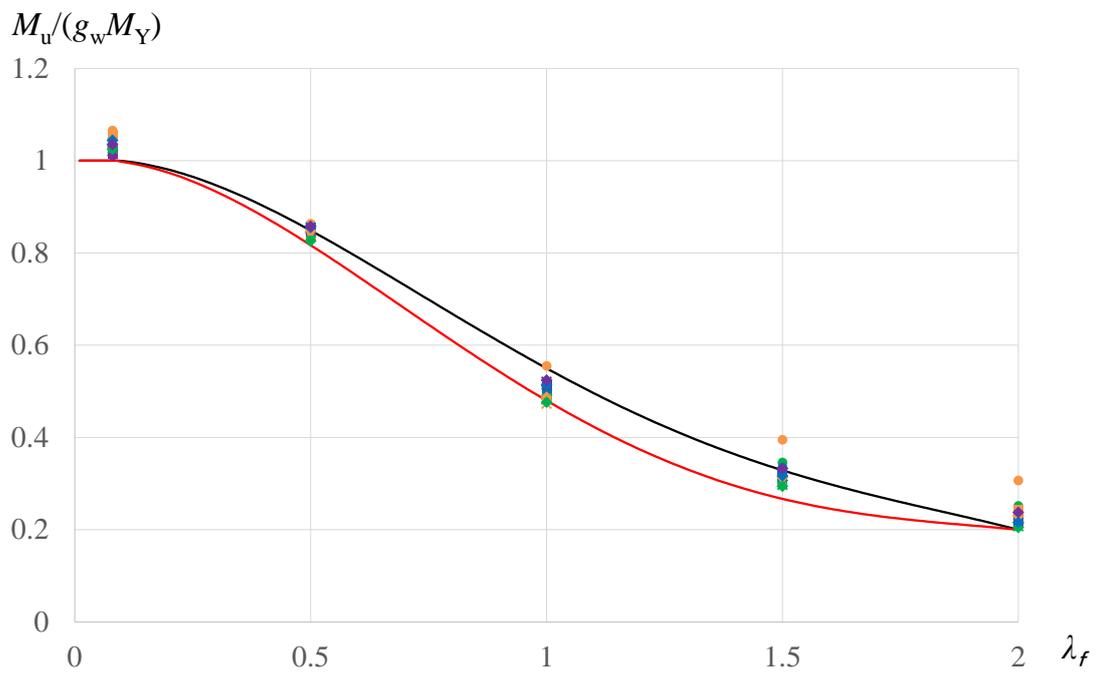


図-K.3 耐荷力式(5.9)と、式(5.10)によってプロットされた解析値の比較 [図-5.13]