

ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金
A6061-T6 桁の曲げ耐荷力

ALST 研究レポート 53

2019 年 2 月

大阪大学大学院工学研究科

清水弘樹, 大倉一郎

概要

ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁の曲げ耐荷力を、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、熱処理アルミニウム合金 A6061-T6 である。

目次

第 1 章 序論	・・・ 1
第 2 章 縦補剛された長方形板の最適断面形状と曲げ耐荷力	・・・ 3
第 3 章 桁の曲げ耐荷力	・・・ 8
第 4 章 FEM による弾塑性有限変位解析	・・・ 12
4.1 桁の断面寸法	・・・ 12
4.2 応力—ひずみ関係	・・・ 13
4.3 接合による強度低下と残留応力	・・・ 13
4.4 初期たわみ	・・・ 14
4.5 境界条件と要素分割	・・・ 15
4.6 ウェブが縦補剛された桁の曲げ耐荷力	・・・ 17
第 5 章 結論	・・・ 23
参考文献	・・・ 25
付録 A 縦補剛された長方形板の要素分割数	・・・ 26
付録 B 図 4.3 の数値データ	・・・ 28
付録 C 終局時の桁の変形	・・・ 32

第1章 序論

アルミニウム合金は軽量で耐食性に優れるため、2000年頃からアルミニウム歩道橋が建設されるようになり、2003年には拡幅歩行者用アルミニウム床版が建設された¹⁾。2011年には道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋が建設され²⁾、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が採用された³⁾。さらに、2016年には、港の栈橋の、劣化した鉄筋コンクリート床版がアルミニウム床版に取り換えられた⁴⁾。このような状況で、道路橋用アルミニウム床版だけでなく、それを支える桁にもアルミニウム合金材が適用されることが期待される。

図1.1に示すように、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、作用する荷重も格段に大きくなるので、0.2%耐力が125MPaのA5083-Oを用いて道路橋の桁を設計することは困難と考えられる。したがって、道路橋の桁の設計には、0.2%耐力が245MPaのA6061-T6を使用することが望まれる。しかし、アルミニウム合金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、垂直補剛材をウェブに連結する隅肉溶接の位置で強度が低下するので、桁全体としての強度も低下する。したがって、A6061-T6を用いる場合、ウェブを横断する接合がない桁構造、すなわち、垂直補剛材が存在しない桁構造を考える必要がある。そこで、アルミニウム合金A6061-T6を活かす桁構造として、図1.2に示す、押出型材を摩擦攪拌接合によって突合せ接合し、ウェブが等間隔に縦補剛されたアルミニウム合金桁が提案された⁵⁾。この桁には中間垂直補剛材が存在せず、ウェブを横断する接合がないので、桁の一断面で強度が低下することはない。

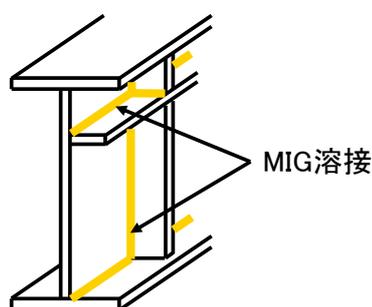


図 1.1 従来のアルミニウム合金桁

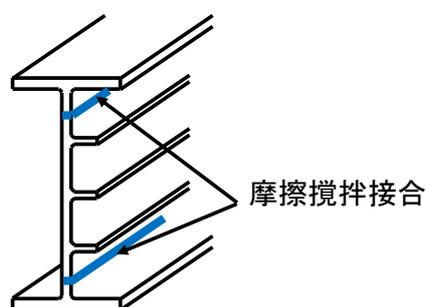


図 1.2 ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁

図1.2に示す、ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁の設計法を確立するために、これまで、面内曲げを受ける長方形板の耐荷力が調べられ⁶⁾、得られた耐荷力をウェブに適

用することにより，曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力の推定式が与えられた⁷⁾．同様に，面内せん断を受ける長方形板の耐荷力が調べられ⁸⁾，得られた耐荷力をウェブに適用することにより，せん断を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力の推定式が与えられた⁹⁾．

押出型材と摩擦攪拌接合を用いると，断面が任意の形状を有する部材の製造が可能である．ALST研究レポートNo.52¹⁰⁾では，縦補剛された長方形板の曲げ座屈強度を最大にする断面形状，すなわち曲げ座屈強度に関する最適断面形状が明らかにされ，この断面形状を有する長方形板の曲げ耐荷力が与えられた．

本研究では，最初に，ALST研究レポートNo.52¹⁰⁾で与えられた曲げ耐荷力を桁のウェブに適用することにより，ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁の曲げ耐荷力の推定式を与える．次に，有限要素法による弾塑性有限変位解析によって得られた結果とこの推定式を与える値とを比較することにより，推定式の妥当性を明らかにする．考慮するアルミニウム合金は，熱処理アルミニウム合金A6061-T6である．

第2章 縦補剛された長方形板の最適断面形状と曲げ耐荷力

ALST 研究レポート No.52¹⁰⁾で与えられた、曲げ座屈強度に関する最適断面形状を表 2.1 に示す。同表で $s = 1$ は無補剛の長方形板を表す。

表 2.1 R と b/t_e の関係および最適断面形状

s	R と b/t_e の関係	最適断面形状		b/t_e の適用範囲
1	$R = \frac{b/t_e}{78.6}$	$\frac{b}{t} = \frac{b}{t_e}$	—	$0 \leq b/t_e \leq 157.1$
2	$R = \frac{b/t_e + 0.8}{87.9}$	$\frac{b}{t} = 1.01 \frac{b}{t_e} + 0.8$	$\frac{t_r}{t} = 0.18 \left(\frac{b}{t_e}\right)^{0.25}$	$25.6 \leq b/t_e \leq 175.0$
3	$R = \frac{b/t_e + 4.2}{112.9}$	$\frac{b}{t} = 1.03 \frac{b}{t_e} + 4.4$	$\frac{t_r}{t} = 0.34 \left(\frac{b}{t_e}\right)^{0.2}$	$29.7 \leq b/t_e \leq 221.5$
4	$R = \frac{b/t_e + 11.6}{137.2}$	$\frac{b}{t} = 1.07 \frac{b}{t_e} + 12.5$	$\frac{t_r}{t} = 0.58 \left(\frac{b}{t_e}\right)^{0.15}$	$29.6 \leq b/t_e \leq 262.8$
5	$R = \frac{b/t_e + 11.7}{133.7}$	$\frac{b}{t} = 1.63 \frac{b}{t_e} - 4.1$	$\frac{t_r}{t} = 0.0155 \frac{b}{t_e} + 0.5$	$28.4 \leq b/t_e \leq 64.5$
	$R = \frac{b/t_e + 26.4}{159.5}$	$\frac{b}{t} = 1.12 \frac{b}{t_e} + 30.0$	$\frac{t_r}{t} = 0.0012 \frac{b}{t_e} + 1.4$	$64.5 \leq b/t_e \leq 292.5$

ここで、図 2.1 を参照して、表 2.1 の記号の説明は次の通りである。

- s : 隣接する縦補剛材で区切られた板要素の総数 ($=b/b_s$)
- b : 長方形板の板幅
- b_s : 隣接する縦補剛材で区切られた板要素の幅
- R : 曲げを受ける長方形板の幅厚比パラメータ
- t_e : 最適断面形状を有する長方形板の等価板厚 [式(2.1)参照]
- t : 長方形板の板厚
- t_r : 縦補剛材の板厚

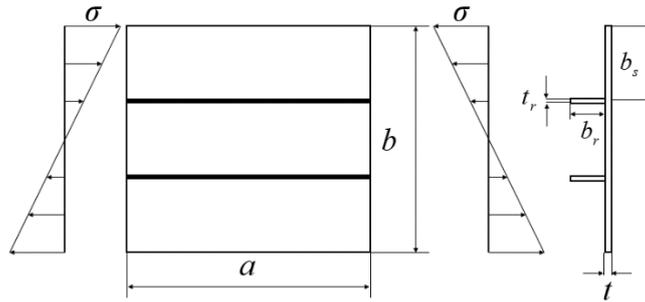


図 2.1 面内曲げを受ける，縦補剛された長方形板

最適断面形状を有する長方形板の等価板厚 t_e は，縦補剛された長方形板の全断面積と同じ大きさの断面積を有する無補剛の長方形板の板厚であり，次式で定義される．

$$t_e = t + \frac{(s-1)b_r t_r}{b} \quad (2.1)$$

ここに， b_r : 縦補剛材の板幅

曲げ圧縮力を受ける縦補剛材が局部座屈を起こさないようにするために， b_r と t_r は次の関係を持つ．

$$\frac{b_r}{t_r} = 6.28 \quad (2.2)$$

表 2.1 に示す，曲げ座屈強度に関する最適断面形状を有する，縦補剛された長方形板の面内曲げ耐荷力は次式で与えられる¹⁰⁾．

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1.5 & (0.3^* \leq R \leq R_0) \\ 1.5 - 0.7 \frac{R - R_0}{R_2 - R_0} & (R_0 \leq R \leq R_2) \\ 0.8 \left(\frac{R_2}{R}\right)^m & (R_2 \leq R \leq 2.0) \end{cases} \quad (2.3)$$

* : $s=1$ に対しては 0

ここに， σ_u : 長方形板の弾性断面係数を基準とした長方形板の面内曲げ耐荷力

$\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力 (=245MPa)

R_0, R_2, m : 表 2.2 に示す値

表 2.2 R_0, R_1, R_2, m の値

s	R_0	R_1	R_2	m
1, 2, 3	0.34	0.94	1.18	0.69
4, 5	0.42	1.10	1.37	0.94

表 2.2 の R_1 は， $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ が 1 になるときの R の値である．式(2.3)の中段の式より， $R_0, R_1,$

R_2 の間には次の関係がある.

$$R_2 = 1.4R_1 - 0.4R_0 \quad (2.4)$$

式(2.4)を式(2.3)の中段の式に代入して次式を得る.

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1.5 & (0.3^* \leq R \leq R_0) \\ 1.5 - 0.5 \frac{R - R_0}{R_1 - R_0} & (R_0 \leq R \leq R_2) \\ 0.8 \left(\frac{R_2}{R}\right)^m & (R_2 \leq R \leq 2.0) \end{cases} \quad (2.5)$$

* : $s=1$ に対しては 0

式(2.5)が与える $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と R の関係を図 2.2 に示す.

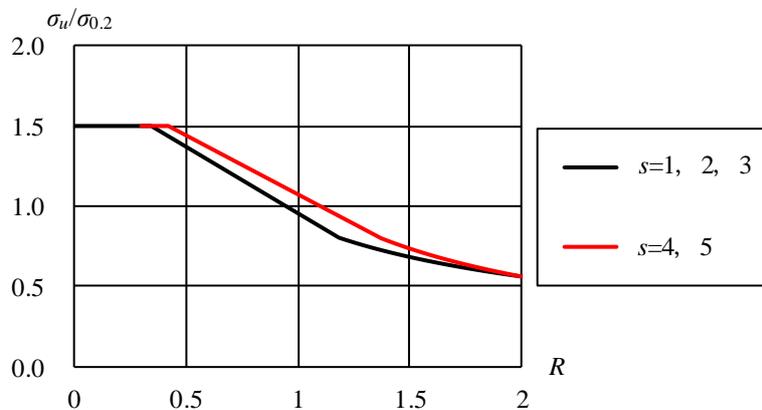


図 2.2 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と R の関係

表 2.1 に示す R と b/t_e の関係を式(2.5)に代入して得られる $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と b/t_e の関係を図 2.3 に示す. パネル数 s の増加に伴って, 面内曲げ耐荷力が増加するが, $s=5$ の耐荷力は $s=4$ の耐荷力に近い. 例として, $b/t_e=100$ に対する, $s=4$ と 5 の曲げ座屈強度に関する最適断面形状とそれに対する耐荷力を表 2.3 に示す. 耐荷力は式(2.5)によって与えられ, 最適断面形状は, 表 2.1 の $s=4$ と 5 に対する最適断面形状に関する式および式(2.2)で与えられる. $s=5$ の耐荷力は, $s=4$ の耐荷力に対して 1%増加する. 縦補剛材の断面積を除いた, 長方形板のみの断面積に関して, $s=5$ の断面積は $s=4$ の断面積に対して 16%減少する. 縦補剛材はせん断力を担わないので, 縦補剛材の断面積を含めた総断面積が同じであっても, $s=5$ のせん断強度は $s=4$ のせん断強度に対して 16%低下する. したがって, 縦補剛された長方形板を, 曲げを受ける桁のウェブに適用する場合には, パネル数 4 が最適である.

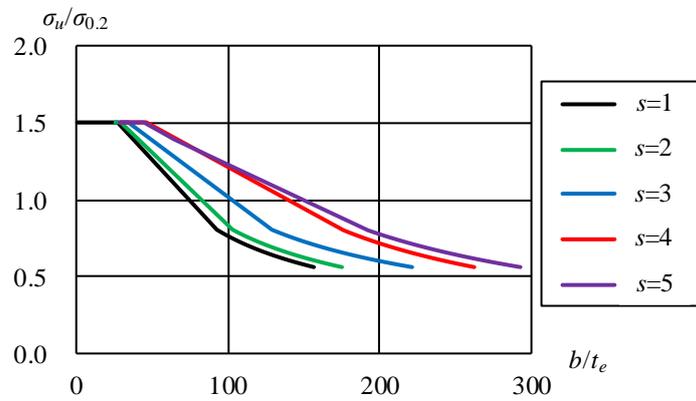


図 2.3 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と b/t_e の関係

表 2.3 曲げ座屈強度に関する最適断面形状と耐荷力

$s=4$	$s=5$
<p style="text-align: center;">単位 mm</p>	<p style="text-align: center;">単位 mm</p>
$\sigma_u/\sigma_{0.2}=1.210$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=1.225$

表 2.1 の $s=4$ に対する R と b/t_e の関係式を式(2.5)に代入して、 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と b/t_e の関係が次式で与えられる。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1.5 & \left(29.6 \leq \frac{b}{t_e} \leq 45.9\right) \\ 1.5 - 0.5 \frac{\frac{b}{t_e} - 45.9}{93.4} & \left(45.9 \leq \frac{b}{t_e} \leq 176.3\right) \\ 0.8 \left(\frac{187.9}{\frac{b}{t_e} + 11.6}\right)^{0.94} & \left(176.3 \leq \frac{b}{t_e} \leq 262.8\right) \end{cases} \quad (2.6)$$

さらに、表 2.1 の $s=4$ に対する b/t と b/t_e の関係式を式(2.6)に用いて次式を得る.

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1.5 & \left(44.2 \leq \frac{b}{t} \leq 61.8\right) \\ 1.5 - 0.005 \left(\frac{b}{t} - 61.8\right) & \left(61.8 \leq \frac{b}{t} \leq 201.6\right) \\ 0.8 \left(\frac{201.6}{b/t}\right)^{0.94} & \left(201.6 \leq \frac{b}{t} \leq 293.7\right) \end{cases} \quad (2.7)$$

他方、表 2.1 の $s=4$ に対する b/t と b/t_e の関係式および t_r/t と b/t_e の関係式から b/t_e を消去して次式を得る.

$$\frac{t_r}{t} = 0.574 \left(\frac{b}{t} - 12.5\right)^{0.15} \quad \left(44.2 \leq \frac{b}{t} \leq 293.7\right) \quad (2.8)$$

式(2.8)は、 $s=4$ の曲げ座屈強度に関する最適断面形状に関して、縦補剛材と長方形板の板厚比 t_r/t と長方形板の幅厚比 b/t の関係を与える。すなわち、 $s=4$ の曲げ座屈強度に関する最適断面形状に関して、長方形板の幅厚比が与えられると縦補剛材の板厚が決まり、式(2.2)より縦補剛材の板幅が決まる。

第3章 桁の曲げ耐荷力

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、上下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

上下対称な桁の場合、図 3.1 を参照して、上下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 1 枚の断面積

b_w : ウェブの幅

σ_{fu} : 圧縮を受けるフランジの横倒れ耐荷力

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。

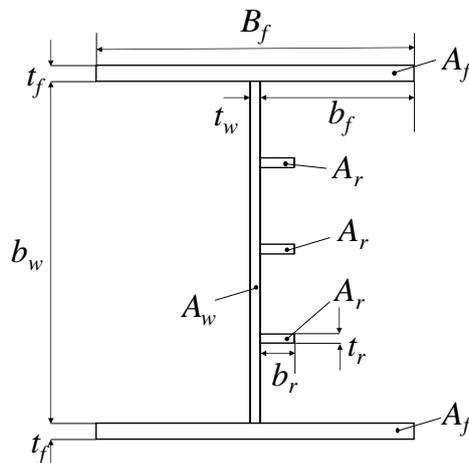


図 3.1 ウェブが縦補剛された桁の断面

前章で述べたように、曲げを受ける桁のウェブに縦補剛された長方形板が適用される場合、パネル数 $s=4$ の曲げ座屈強度に関する最適断面形状が耐荷力の観点から最適である。図 3.1 を参照して、 $s=4$ のウェブの断面二次モーメントは次式で与えられる。

$$I_w = \frac{t_w b_w^3}{12} + 3 \frac{b_r t_r^3}{12} + 2 b_r t_r \left(\frac{b_w}{4} \right)^2 \cong \frac{A_w b_w^2}{12} + \frac{A_r b_w^2}{8} = \frac{b_w^2}{12} \left(A_w + \frac{3}{2} A_r \right) = \frac{A_{wr} b_w^2}{12} \quad (3.3)$$

$$A_{wr} = A_w + \frac{3}{2} A_r = b_w t_w + \frac{3}{2} b_r t_r \quad (3.4)$$

ここに、 I_w : 片側に縦補剛されたウェブの断面二次モーメント

A_w : 縦補剛材の断面積を除いたウェブの断面積 ($=b_w t_w$)

b_r : 縦補剛材の板幅

t_r : 縦補剛材の板厚

A_r : 縦補剛材 1 本の断面積 ($=b_r t_r$)

縦補剛されたウェブの弾性断面係数 W_w は次式で与えられる。

$$W_w = \frac{2I_w}{b_w} = \frac{1}{6} A_{wr} b_w \quad (3.5)$$

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。

$$M_{wu} = \sigma_{wu} W_w = \frac{1}{6} \sigma_{wu} A_{wr} b_w \quad (3.6)$$

ここに、 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(3.6)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。

$$M_u = b_w \left(\sigma_{fu} A_f + \frac{1}{6} \sigma_{wu} A_{wr} \right) \quad (3.7)$$

他方、ウェブが縦補剛された桁の断面二次モーメントは次式で与えられる。

$$I \cong \frac{A_f b_w^2}{2} + I_w = \frac{A_f b_w^2}{2} + \frac{A_{wr} b_w^2}{12} = \frac{b_w^2}{2} \left(A_f + \frac{A_{wr}}{6} \right) \quad (3.8)$$

ここに、 I : ウェブの片側が縦補剛された桁の断面二次モーメント

さらに、桁の弾性断面係数 W は次式で与えられる。

$$W = \frac{I}{\frac{b_w + 2t_f}{2}} \cong b_w \left(A_f + \frac{1}{6} A_{wr} \right) \quad (3.9)$$

したがって、桁の降伏曲げモーメント M_Y は次式で与えられる。

$$M_Y = \sigma_{0.2} W = \sigma_{0.2} b_w \left(A_f + \frac{1}{6} A_{wr} \right) \quad (3.10)$$

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

式(3.7)を式(3.10)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。

$$\frac{M_u}{M_Y} = \frac{\sigma_{fu} + \frac{1}{6} \frac{A_{wr}}{A_f} \sigma_{wu}}{\sigma_{0.2} \left(1 + \frac{1}{6} \frac{A_{wr}}{A_f} \right)} = \frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} \frac{1 + \frac{1}{6} \frac{A_{wr}}{A_f} \frac{\sigma_{wu}}{\sigma_{fu}}}{1 + \frac{1}{6} \frac{A_{wr}}{A_f}} \quad (3.11)$$

フランジの横倒れ耐荷力 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(3.11)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。

$$\frac{M_u}{M_Y} = \frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} \frac{1 + \frac{A_{wr}}{6A_f} \frac{\sigma_{wu}}{\sigma_{0.2}}}{1 + \frac{A_{wr}}{6A_f}} \quad (3.12)$$

式(3.12)は、文献7)で定式化された、ウェブが縦補剛されない桁の曲げ耐荷力式において A_w を A_{wr} に置き換えた形式となっている。

式(2.7)で与えられた、面内曲げを受ける、縦補剛された長方形板の耐荷力 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ が、桁のウェブに適応できると仮定して、これを式(3.12)の $\sigma_{wu}/\sigma_{0.2}$ に用いて、桁の終局曲げモーメントが次式で与えられる。

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

$$g_w = \begin{cases} \frac{1 + \frac{A_{wr}}{4A_f}}{1 + \frac{A_{wr}}{6A_f}} & \left(44.2 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 61.8\right) \\ 1 - \frac{\frac{A_{wr}}{A_f}}{1200 \left(1 + \frac{A_{wr}}{6A_f}\right)} \left(\frac{b_w}{t_w} - 161.8\right) & \left(61.8 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 201.6\right) \\ \frac{1 + \frac{2A_{wr}}{15A_f} \left(\frac{201.6}{b_w/t_w}\right)^{0.94}}{1 + \frac{A_{wr}}{6A_f}} & \left(201.6 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 293.7\right) \end{cases} \quad (3.14)$$

式(3.13)と(3.14)で与えられる桁の終局曲げモーメント M_u/M_Y とウェブの幅厚比 b_w/t_w の関係を図3.2に示す。

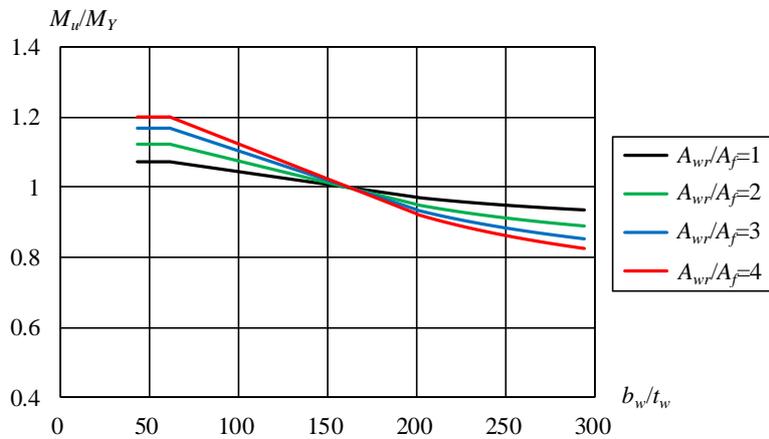


図3.2 M_u/M_Y と b_w/t_w の関係 ($\sigma_{fu}/\sigma_{0.2}=1.0$)

ウェブが縦補剛されない桁に対して文献7)で与えられた、圧縮を受けるフランジの横倒れ耐荷力が式(3.13)の $\sigma_{fu}/\sigma_{0.2}$ に適用できると仮定する.

$$\frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda_f \leq 0.13) \\ 1.01 - 0.03\lambda_f - 0.30\lambda_f^2 - 0.04\lambda_f^3 + 0.05\lambda_f^4 & (0.13 \leq \lambda_f \leq 2) \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\lambda_f = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} K \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{B_f} \quad (3.16)$$

ここに、 λ_f : 圧縮フランジの細長比パラメータ
 l : 圧縮フランジの固定点間距離
 B_f : フランジの全幅 (図 3.1 参照)
 E : ヤング率
 K : 修正係数

修正係数 K は、ウェブが縦補剛されない桁に対して次式で与えられる.

$$K = 0.87 + 0.13 \frac{A_{wr}}{A_f} \quad \left(1 \leq \frac{A_{wr}}{A_f} \leq 4 \right) \quad (3.17)$$

ここで、パネル数 $s=4$ で縦補剛されたウェブの断面形状は次式で与えられる.

$$\frac{t_r}{t_w} = 0.574 \left(\frac{b_w}{t_w} - 12.5 \right)^{0.15} \quad \left(44.2 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 293.7 \right) \quad (3.18)$$

$$\frac{b_r}{t_r} = 6.28 \quad (3.19)$$

ここに、 b_r : 縦補剛材の板幅
 t_r : 縦補剛材の板厚

第4章 FEMによる弾塑性有限変位解析

4.1 桁の断面寸法

ウェブが縦補剛された桁の曲げ耐荷力の推定式(3.13)の妥当性を明らかにするために、曲げを受ける桁の弾塑性有限変位解析を FEM によって行う。解析対象の桁の断面寸法を表 4.1 に示す。パネル数は 4 である。圧縮フランジが横倒れ座屈を生じない場合、すなわち $\sigma_{fi}/\sigma_{0.2}=1.0$ の場合、 $b_w/t_w=61.8$ は桁が全塑性モーメントに達するときのウェブの幅厚比であり、 $b_w/t_w=162.0$ は桁が降伏モーメントに達するときのウェブの幅厚比である。 $b_w/t_w=280.8$ は、 $b_w/t_w=162.0$ の 2 倍を目安とした値である。

表 4.1 桁の断面寸法

b_w/t_w	t_r/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_r (mm)	b_r (mm)	A_{wr} (mm ²)	A_{wr}/A_f	t_f (mm)	b_f (mm)
61.8	1.03	20	1235.3	20.6	129.4	24705.1	1	48.1	288.5
							2	33.8	202.6
							3	27.4	164.5
							4	23.6	141.8
162.0	1.22	10	1619.8	12.2	76.3	16198.1	1	37.9	227.2
							2	26.7	160.0
							3	21.7	130.1
							4	18.7	112.4
280.8	1.33	5	1403.8	6.6	41.6	7019.1	1	24.7	148.1
							2	17.4	104.3
							3	14.2	85.0
							4	12.2	73.4

ウェブの幅厚比 b_w/t_w の所定の値に対して、縦補剛材とウェブの板厚比 t_r/t_w の値が式(3.18)によって与えられる。次に、ウェブの任意の板厚 t_w の値に対して、ウェブの板幅 b_w および縦補剛材の板厚 t_r の値が決まり、式(3.19)より、縦補剛材の板幅 b_r の値が決まる。 b_w , t_w , b_r , t_r の値を式(3.4)に代入して、 A_{wr} の値が算出される。

フランジに局部座屈が生じないようにするために、片側のフランジを自由突出板とみなし、片側のフランジの幅厚比 β_f を、次式を満たすように設定する。

$$\beta_f \leq \pi \sqrt{\frac{0.425}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} R_{f1} \quad (4.1)$$

ここに、 β_f : 片側のフランジの幅厚比

R_{fl} : 自由突出板が 0.2%耐力を維持する限界の幅厚比パラメータの値

アルミニウム合金 A6061-T6 の 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ は 245MPa であり、 R_{fl} は 0.6 である¹¹⁾。これらの値に対して、式(4.1)の右辺は 6.28 になり、 β_f に対して 6 を採用する。

図 3.1 を参照して、フランジの断面積 A_f は次式で与えられる。

$$A_f = t_f(2b_f + t_w) \quad (4.2)$$

β_f を用いて、片側のフランジの板幅 b_f が次式で与えられる。

$$b_f = \beta_f t_f \quad (4.3)$$

したがって、 A_f は次式になる。

$$A_f = t_f(2\beta_f t_f + t_w) \quad (4.4)$$

この式を t_f について整理して次式を得る。

$$2\beta_f t_f^2 + t_w t_f - A_f = 0 \quad (4.5)$$

A_{wr}/A_f の所定の値に対して、 A_{wr} に対応する A_f の値が決まり、この値と t_w の値を式(4.5)に代入して、 t_f が算出される。さらに、式(4.3)より b_f が決まる。 A_{wr}/A_f に対して 1, 2, 3, 4 を考慮する。

4.2 応力-ひずみ関係

アルミニウム合金 A6061-T6 の応力-ひずみ関係に対して次式を用いる¹²⁾。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^{29.1} \quad (\sigma \leq \sigma_{0.2}) \quad (4.6)$$

$$\sigma = \sigma_{0.2} \quad (\sigma \geq \sigma_{0.2}) \quad (4.7)$$

ここに、 ε : ひずみ

σ : 応力

E : ヤング率 (=70MPa)

$\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力 (=245MPa)

4.3 接合による強度低下と残留応力

ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁は、図1.2に示すように、摩擦撹拌接合により押出型材を突合せ接合することによって製作される。摩擦撹拌接合はMIG溶接に比べて入熱量が少ないので、摩擦撹拌接合部の強度低下とその範囲はMIG溶接のそれらより小さくなるが、摩擦撹拌接合においても接合部は強度低下を生じる。これに対して、強度低下が生じる、接合中心から各側25mm、すなわち50mmの範囲の板厚を、次式で与えられる板厚に増厚することにより、0.2%耐力に関して、接合部の断面強度を母材のそれと同じにとることができる¹³⁾。

$$t_{wj} = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{j0.2}} t_w = \frac{245}{105} t_w = 2.33 t_w \quad (4.8)$$

ここに、 t_{wj} : ウェブの摩擦撹拌接合部（接合中心から各側25mm，すなわち50mmの範囲）の板厚
 t_w : ウェブ母材の板厚
 $\sigma_{0.2}$: ウェブ母材の0.2%耐力 (=245MPa)
 $\sigma_{j0.2}$: 摩擦撹拌接合部の0.2%耐力¹³⁾ (=105MPa)

摩擦撹拌接合によって接合中心から各側 25mm，すなわち 50mm の範囲のウェブ厚をウェブ母材の厚さの 2.33 倍された長方形板の面内曲げ耐荷力は，摩擦撹拌接合による強度低下および残留応力が考慮されない，非接合の長方形板の面内曲げ耐荷力より高くなることが示されている¹⁴⁾。したがって，摩擦撹拌接合による接合部の強度低下および残留応力を考慮せず，非接合桁のみを考慮する。

4.4 初期たわみ

図 4.1 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。

$$w_0 = \frac{l}{1000} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (4.9)$$

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。

$$w_0 = \frac{b_w}{250} \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_w + t_f}\right) + \frac{l}{1000} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (4.10)$$

ここに， n : 自然数

式(4.10)の自然数 n は次式を満たす値である。

$$n = 1 \quad \left(\frac{l}{a} < 0.5\right) \quad (4.11)$$

$$\frac{l}{a} - 0.5 < n \leq \frac{l}{a} + 0.5 \quad \left(0.5 \leq \frac{l}{a}\right) \quad (4.12)$$

ここで， a は曲げを受ける，縦補剛された長方形板の座屈波形の半波長であり，次式で与えられる¹⁰⁾。

$$a = \frac{2}{3} b_w \left\{ 1 + \frac{4s(1 - \mu^2)j(b_r/t_r)^3(t_r/t_w)^4}{b_w/t_w} \right\}^{0.25} \quad (4.13)$$

ここで， $s=4$ ， $j=1$ である。式(4.12)は， l/a の値を四捨五入した値を自然数 n に使用することを表している。

式(4.9)の $l/1000$ は，アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）¹³⁾で規定される，圧縮部材に対する製作精度であり，式(4.10)の $b_w/250$ は，同指針（案）で規定される，桁ウェブに対する製作精度である。

図 4.1 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。ウェブに対する初期たわみにおいて n が奇数の場合，初期たわみ形状が

$x=l/2$ に関して対称となるので、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、桁の半分を解析対象とする。ウェブに対する初期たわみにおいて n が偶数の場合、初期たわみ形状が $x=l/2$ に関して逆対称となるので、桁の全長を解析対象とする。

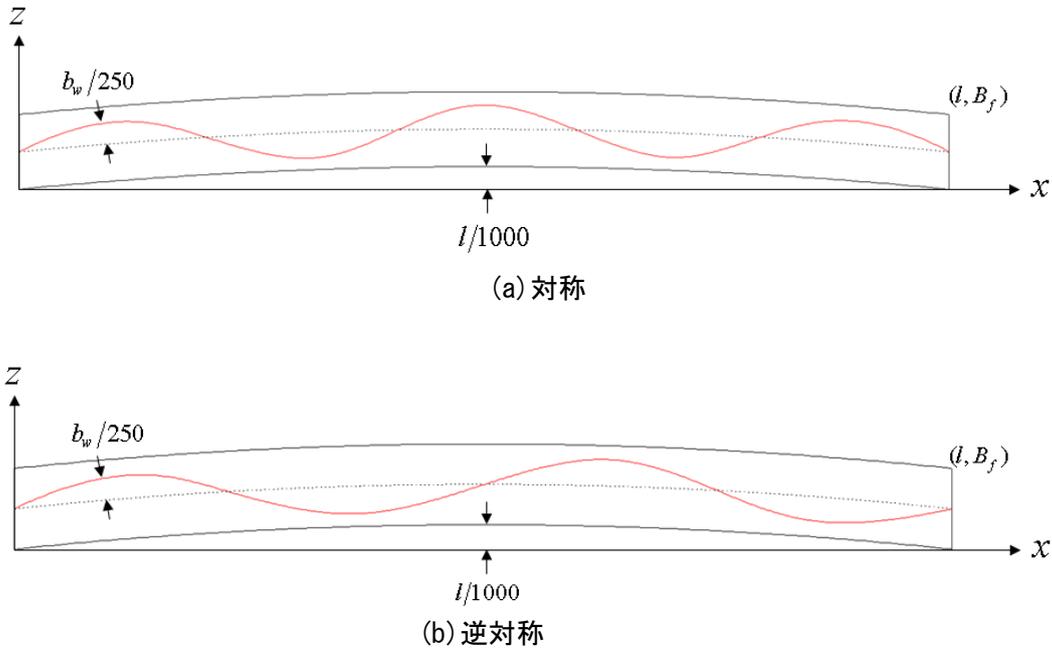


図 4.1 フランジとウェブの初期たわみ

4.5 境界条件と要素分割

曲げを受ける、ウェブが縦補剛された桁の弾塑性有限変位解析には、汎用有限要素プログラム MARC を用いる¹⁵⁾。初期たわみ形状が対称の場合、図 4.2 に示すように、解析対象の半分を要素分割する。これに対する境界条件を表 4.2 (a) に示す。中点 M を中心として、 $x=0$ 上の辺 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 に剛棒を設け、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、ウェブ、フランジ、縦補剛材に対して 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。さらに、縦補剛材の端面に関しては、 x 軸方向と y 軸方向の変位を、それぞれ、縦補剛材が長方形板の端面と交差する節点の x 軸方向と y 軸方向の変位と同じにするようにする。

初期たわみが逆対称の場合，解析対象全体を要素分割する．これに対する境界条件を表 4.2 (b) に示す．前述した剛棒を長方形板の両端に設け，両端から桁に曲げ荷重を与える．

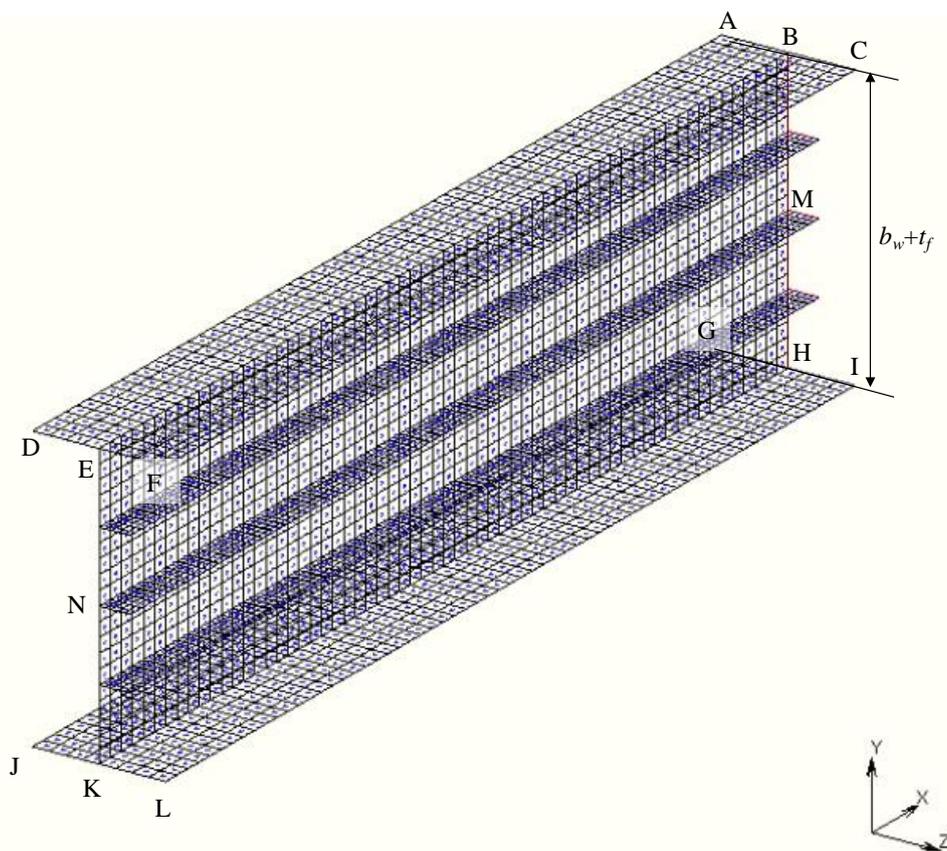


図 4.2 要素分割

表 4.2 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	固定	—	—	固定	固定
辺 DF					
辺 JL					

(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	—	—

要素分割数と解析精度の関係⁷⁾より、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 の範囲になるような分割とする。ウェブの隣接する縦補剛材間の分割を 5 等分割以上とし（付録 A 参照）、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分割する。縦補剛材の幅方向の分割数は 5 とする¹⁰⁾。

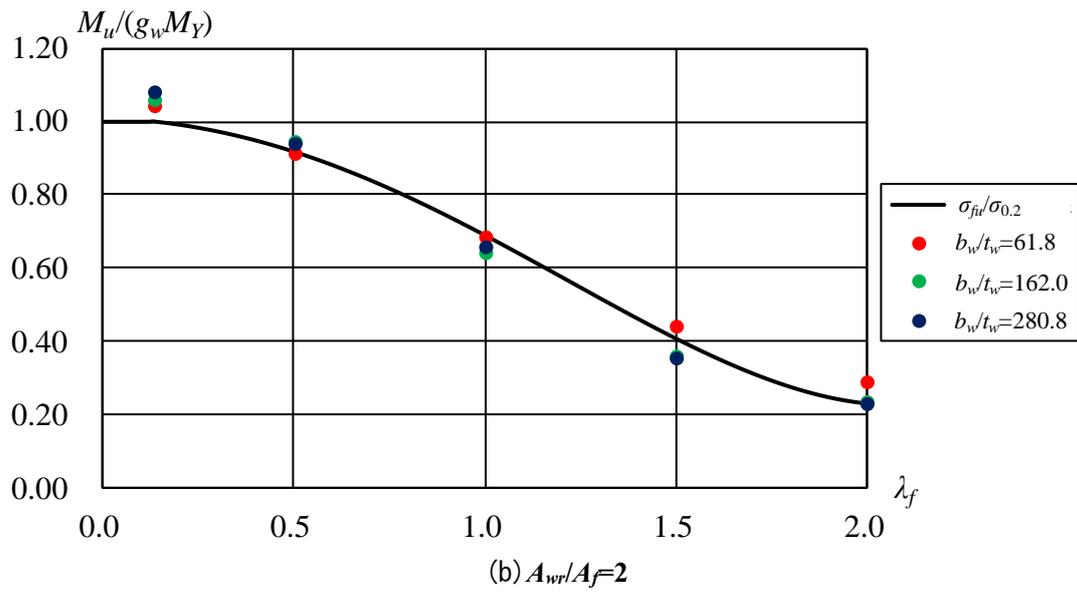
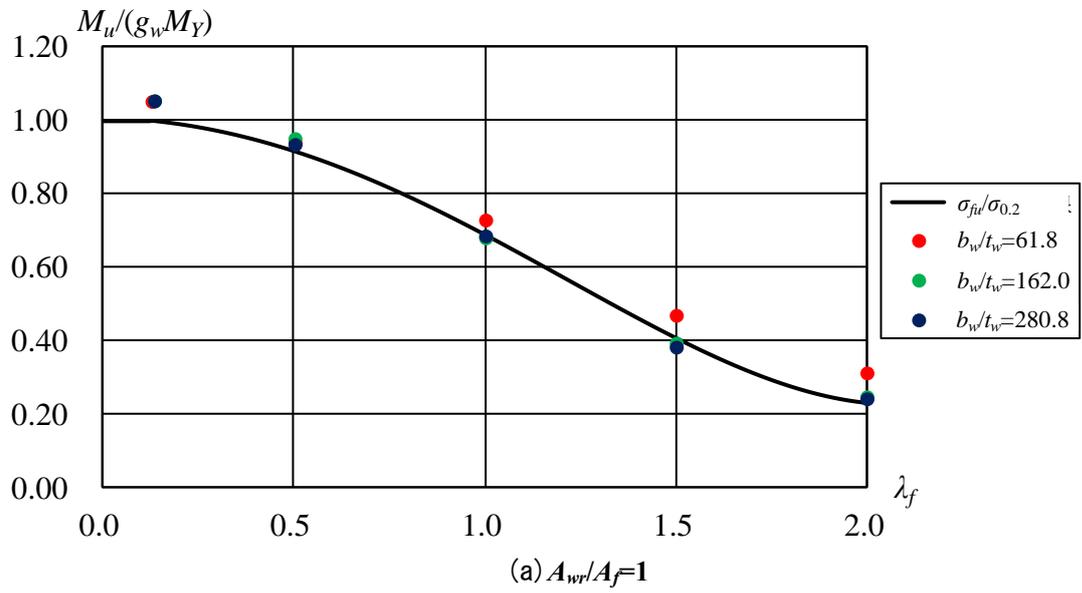
4.6 ウェブが縦補剛された桁の曲げ耐荷力

式(3.13)は次式に変形できる。

$$\frac{M_u}{g_w M_Y} = \frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} \quad (4.14)$$

式(4.14)が与える横倒れ耐荷力と解析値の比較を図 4.3 に示す。解析値は、 $b_w/t_w=61.8$, 162.0, 280.8 の各値に対して、 λ_f を変化させて算出された M_u を $g_w M_Y$ で除して無次元化された値である。ここで、 λ_f を与える式(3.16)の K の値を 1 としている。解析値の数値データを付録 B に示す。さらに、終局時の桁の変形を付録 C 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において、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、解析値の 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。

$$W = \frac{\frac{t_w b_w^3}{12} + 2 \left\{ \frac{B_f t_f^3}{12} + t_f B_f \left(\frac{b_w + t_f}{2} \right)^2 \right\} + 3 \frac{b_r t_r^3}{12} + 2 b_r t_r \left(\frac{b_w}{4} \right)^2}{\frac{b_w + 2t_f}{2}} \quad (4.15)$$



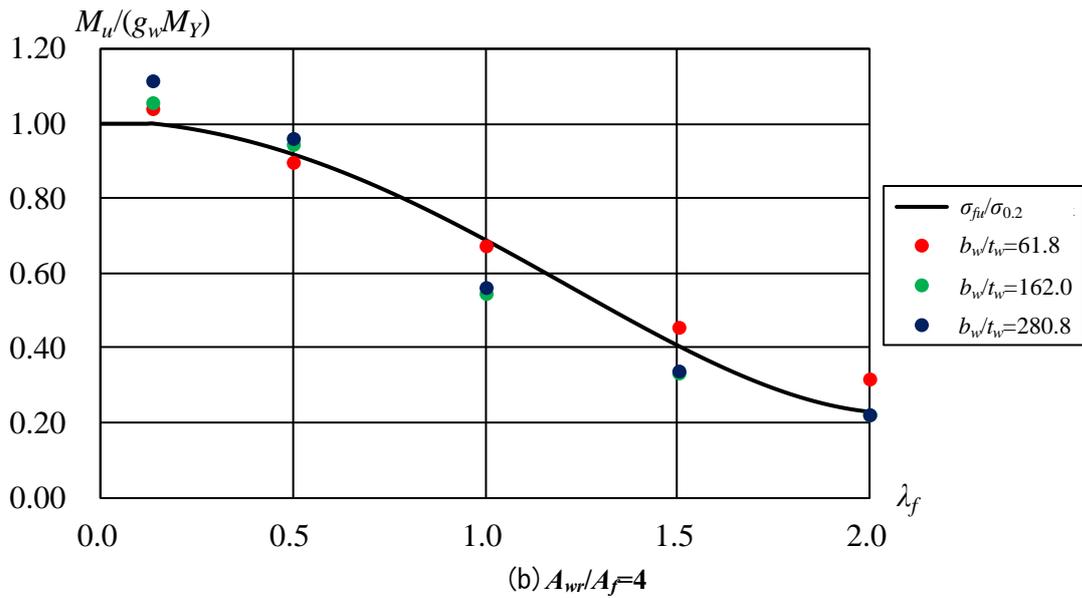
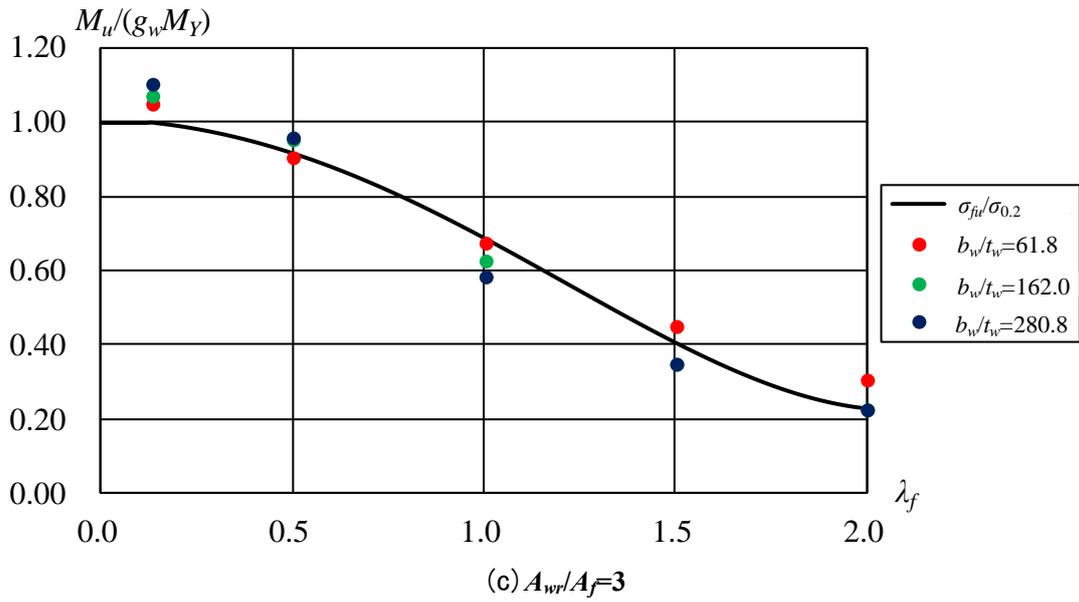


図 4.3 耐荷力式(4.14)と解析値の比較

図 4.3 に示すように、 A_{wr}/A_f が大きくなるに従って、解析値は低下し、耐荷力曲線を下回る値が生じる。そこで、耐荷力曲線を下回った解析値が耐荷力曲線の右側に来るように式(3.16)の K の値を調整する。調整された K の値を表 4.3 に示す。 K と A_{wr}/A_f の関係を図 4.4 に示す。両者の関係は次式で近似される。

$$K = 0.97 + 0.07 \frac{A_{wr}}{A_f} \quad \left(1 \leq \frac{A_{wr}}{A_f} \leq 4 \right) \quad (4.16)$$

表 4.3 K の値

A_{wr}/A_f	K
1	1.04
2	1.11
3	1.19
4	1.25

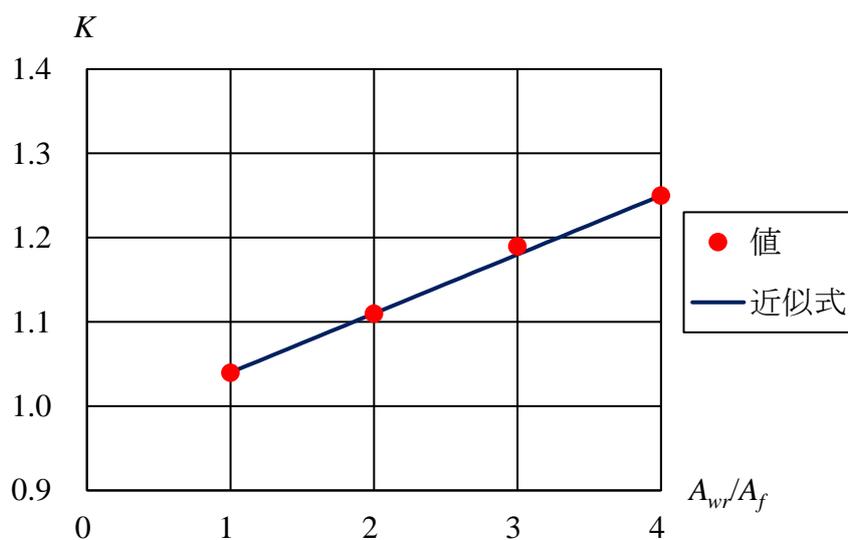
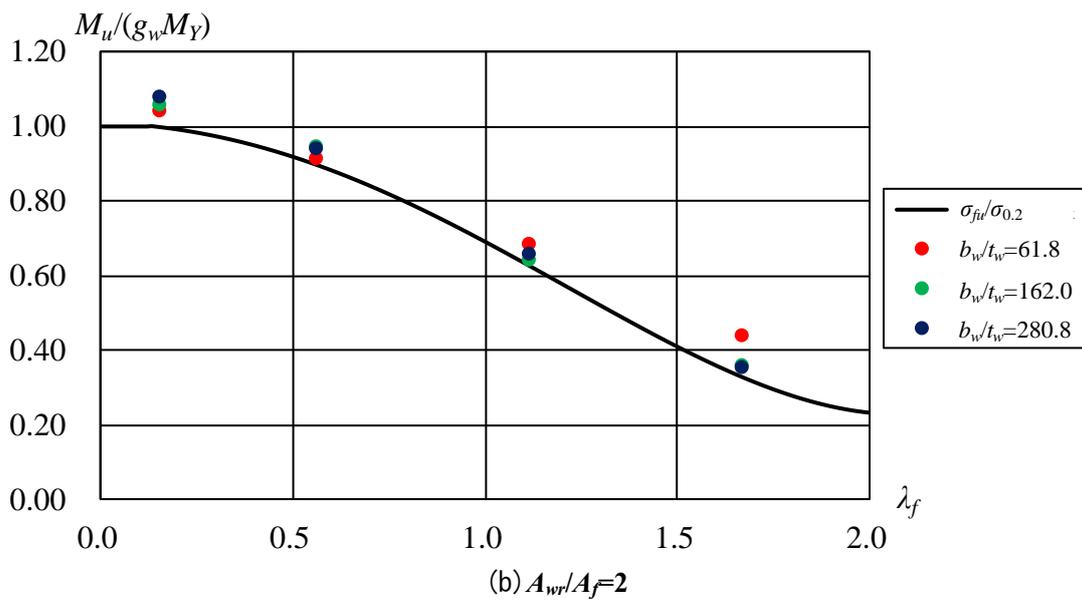
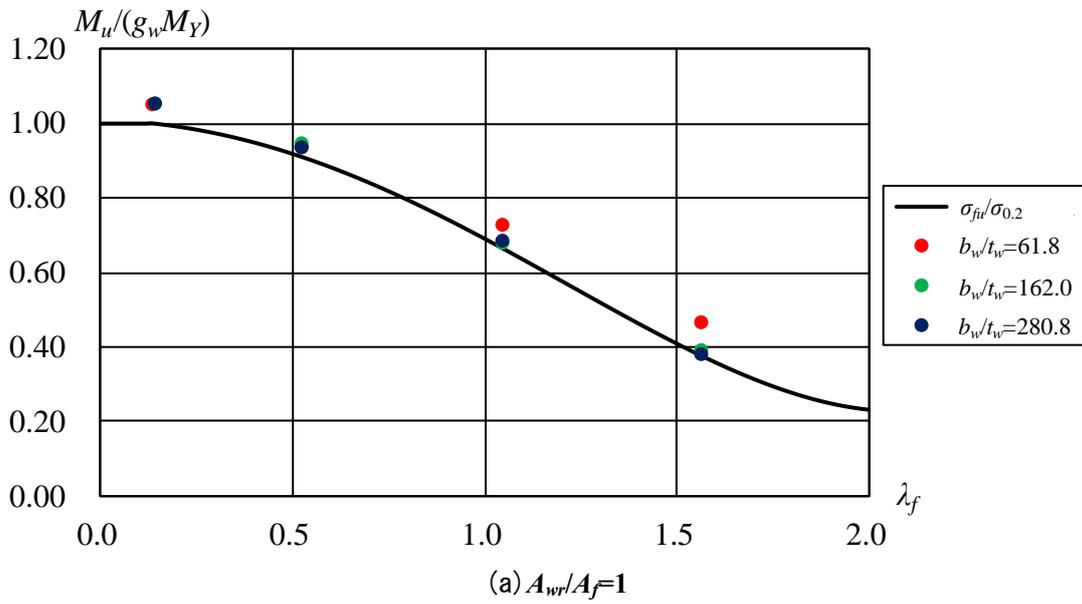


図 4.4 K と A_{wr}/A_f の関係

耐荷力式(4.14)と、式(4.16)が式(3.16)の K に用いられた λ_f によってプロットされた解析値との比較を図 4.5 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。したがって、式(4.16)が式(3.16)の K に用いられた λ_f を用いることによって、ウェブがパネル数 4 で縦補剛されたアルミニウム合金桁の曲げ耐荷力を式(3.13)～(3.16)によって推定することができる。



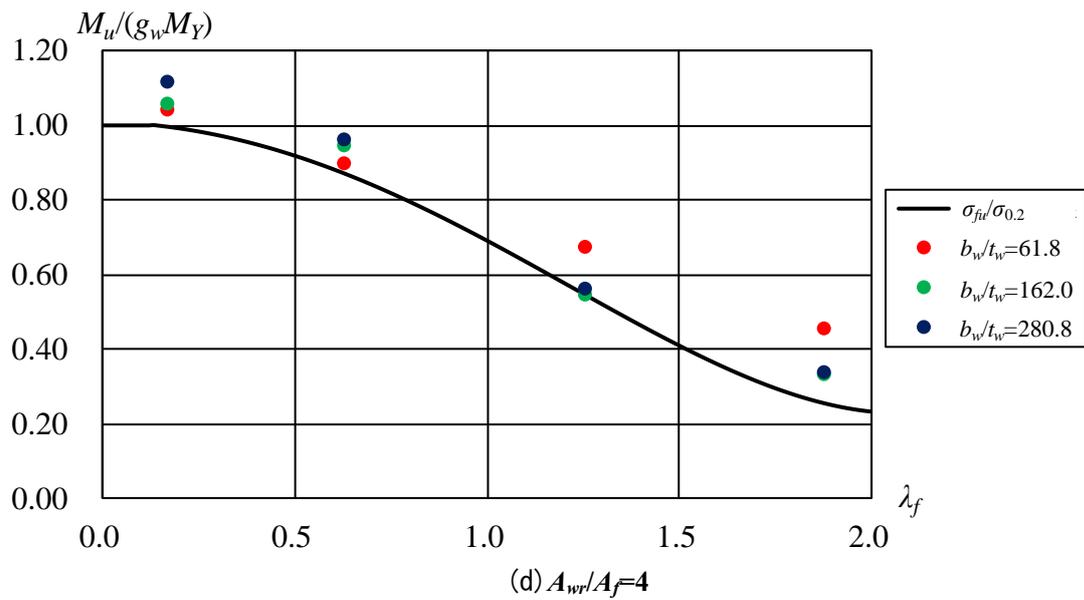
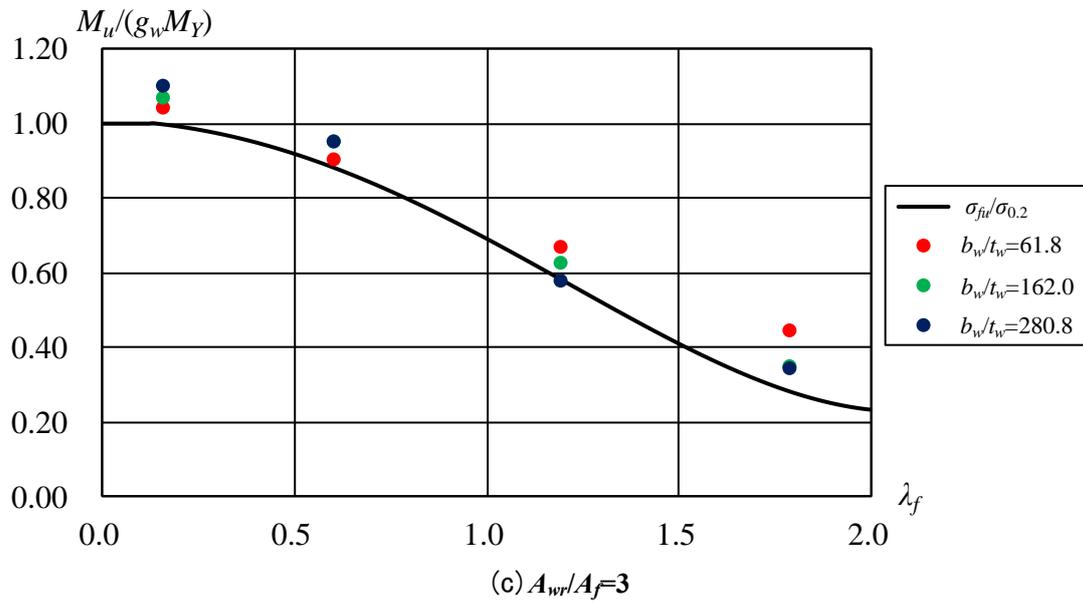


図 4.5 耐荷力式(4.14)と、式(4.16)が式(3.16)に用いられた λ_f によって
 プロットされた解析値との比較

第 5 章 結論

本研究では、ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁の曲げ耐荷力を、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した。本研究で得られた主な結論は次の通りである。

1. 曲げ座屈強度に関する最適断面形状を有する、縦補剛された長方形板の面内曲げ耐荷力はパネル数の増加に伴って増加する。しかし、パネル数4の面内曲げ耐荷力からパネル数5の面内曲げ耐荷力の増加はわずかである。パネル数5のせん断強度はパネル数4のせん断強度より大きく低下する。したがって、縦補剛された長方形板を、曲げを受ける桁のウェブに適用する場合、パネル数4が最適である。
2. 前述のパネル数が4の縦補剛板がウェブに適用されたアルミニウム合金桁の曲げ耐荷力の推定式が誘導された。この推定式が与える値と有限要素法による弾塑性有限変位解析によって得られる耐荷力値とを比較することによって、ウェブが縦補剛された桁の曲げ耐荷力の推定式が次のように与えられた。

$$\frac{M_u}{M_Y} = \frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} g_w \quad (5.1)$$

ここに、

$$g_w = \begin{cases} \frac{1 + \frac{A_{wr}}{4A_f}}{1 + \frac{A_{wr}}{6A_f}} & \left(44.2 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 61.8\right) \\ 1 - \frac{\frac{A_{wr}}{A_f}}{1200 \left(1 + \frac{A_{wr}}{6A_f}\right)} \left(\frac{b_w}{t_w} - 161.8\right) & \left(61.8 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 201.6\right) \\ \frac{1 + \frac{2A_{wr}}{15A_f} \left(\frac{201.6}{b_w/t_w}\right)^{0.94}}{1 + \frac{A_{wr}}{6A_f}} & \left(201.6 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 293.7\right) \end{cases} \quad (5.2)$$

$$A_{wr} = A_w + \frac{3}{2} A_r \quad (5.3)$$

$$\frac{\sigma_{fu}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda_f \leq 0.13) \\ 1.01 - 0.03\lambda_f - 0.30\lambda_f^2 - 0.04\lambda_f^3 + 0.05\lambda_f^4 & (0.13 \leq \lambda_f \leq 2) \end{cases} \quad (5.4)$$

$$\lambda_f = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} K \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{B_f} \quad (5.5)$$

$$K = 0.97 + 0.07 \frac{A_{wr}}{A_f} \quad \left(1 \leq \frac{A_{wr}}{A_f} \leq 4 \right) \quad (5.6)$$

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 ($=\sigma_{0.2}W$)

W : 桁の弾性断面係数

$\sigma_{0.2}$: アルミニウム合金の 0.2%耐力 ($=245\text{MPa}$)

b_w : ウェブの板幅

t_w : ウェブの板厚

A_f : フランジ 1 枚の断面積 ($=B_f t_f$)

A_w : 縦補剛材の断面積を除いたウェブの断面積 ($=b_w t_w$)

A_r : 縦補剛材 1 本の断面積 ($=b_r t_r$)

b_r : 縦補剛材の板幅

t_r : 縦補剛材の板厚

λ_f : 圧縮フランジの細長比パラメータ

l : 圧縮フランジの固定点間距離

B_f : フランジの全幅

E : ヤング率 ($=70\text{GPa}$)

K : 修正係数

パネル数が4で縦補剛されたウェブの断面形状は次式で与えられる。

$$\frac{t_r}{t_w} = 0.574 \left(\frac{b_w}{t_w} - 12.5 \right)^{0.15} \quad \left(44.2 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 293.7 \right) \quad (5.7)$$

$$\frac{b_r}{t_r} = 6.28 \quad (5.8)$$

摩擦撻拌接合によって桁が製作される際には、接合中心から各側 25mm、すなわち 50mm の範囲のウェブ厚をウェブ母材の厚さの 2.33 倍以上にしなければならない。

参考文献

- 1) 鋼構造委員会：21世紀の建設材料 アルミニウム合金の可能性，土木学会，平成22年度全国大会研究会討論会，研-06 資料，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，Vol.50，No.3，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，Vol.49，No.11，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) 大倉一郎，北村幸嗣，赤崎圭輔，卯瀧高久，ビッグ・ラズロ・ゲルゲリ，三河克己：新しいアルミニウム合金製補剛桁の提案，構造工学論文集，Vol.51A，pp.203-210，2005.
- 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) 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.
- 8) 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，Vol.69，No.3，pp.491-504，2013.
- 9) 山中誠矢，大倉一郎：せん断力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.49，2017.
- 10) 清水弘樹，大倉一郎：面内曲げ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，ALST研究レポート，No.52，2018.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) MSC.Software Corporation: Marc Mentat 2018.0.0.

付録A 縦補剛された長方形板の要素分割数

縦補剛された長方形板の耐荷力と隣接する縦補剛材間の幅方向の要素分割数の関係を表 A. 1 に示す。解析値は、 $s=4$ で、 $b/t=73.6, 147.4, 235.3$ に対する最適断面形状を有する縦補剛された長方形板の結果である。図 A. 1 を参照して、解析対象の寸法を表 A. 2 に示す。長方形板の長さ a は次式で与えられる。

$$a = \frac{2}{3}b \left\{ 1 + \frac{4s(1 - \mu^2)j(b_r/t_r)^3(t_r/t)^4}{b/t} \right\}^{0.25} \quad (\text{A.1})$$

さらに、長方形板に対して次式で与えられる初期たわみを仮定する。

$$w_0 = -\frac{b}{250} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) + \frac{b}{150s} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{s\pi y}{b}\right) \quad (\text{A.2})$$

ここに、 m ：隣接する縦補剛材間の局部座屈に対する初期たわみの x 軸方向のモード数¹⁰⁾

表 A. 1 から分かるように、 b/t の各値に対して解析値はほぼ同じ値を示す。したがって、隣接する縦補剛材間の幅方向の要素分割数は 5 で十分である。

表 A. 1 耐荷力と隣接する縦補剛材間の幅方向の要素分割数の関係

b/t	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$				
	隣接する縦補剛材間の幅方向の要素分割数				
	10	8	6	5	4
73.6	1.465	1.465	1.465	1.465	1.467
147.4	1.067	1.068	1.068	1.068	1.069
235.3	0.696	0.695	0.697	0.698	0.699

表 A. 2 解析対象の寸法

b/t	b (mm)	t (mm)	b_r (mm)	t_r (mm)	a (mm)	m
73.6	600	8.15	54.2	8.63	1125.0	8
147.4	600	4.07	30.3	4.82	1058.7	7
235.3	600	2.55	20.7	3.29	1029.5	7

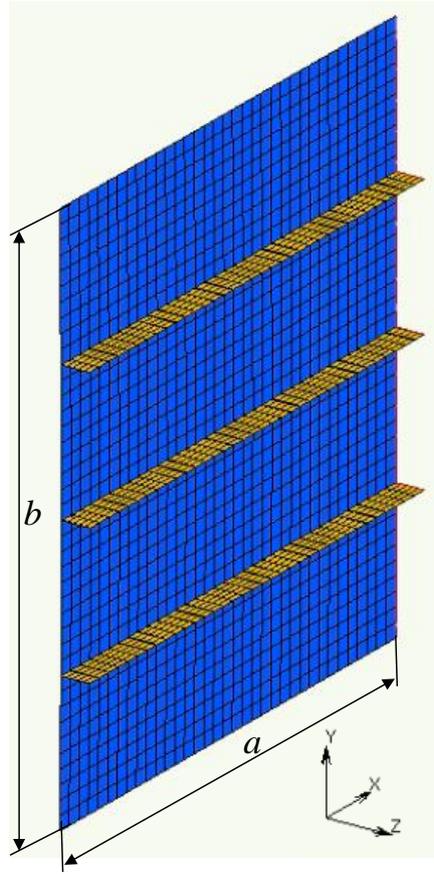


图 A.1 要素分割

付録B 図4. 3の数値データ

(a) $A_{wr}/A_f=1$

b_w/t_w	λ_f	l (mm)	a (mm)	l/a	n	M_Y (N · mm)	M_u/M_Y	g_w	$M_u/(g_w M_Y)$
61.8	0.13	1189.6	2023.4	0.59	1	10045971941	1.125	1.07	1.050
	0.50	4575.5		2.26	2		1.004		0.937
	1.00	9151.0		4.52	5		0.779		0.727
	1.50	13726.6		6.78	7		0.502		0.469
	2.00	18302.1		9.05	9		0.336		0.314
162.0	0.13	925.6	2464.4	0.38	1	8096247348	1.052	1.00	1.052
	0.50	3559.5		1.44	1		0.950		0.950
	1.00	7119.6		2.89	3		0.679		0.679
	1.50	10679.4		4.33	4		0.390		0.390
	2.00	14239.2		5.78	6		0.245		0.245
280.8	0.13	600.2	2034.3	0.30	1	2968929730	0.993	0.94	1.055
	0.50	2308.3		1.13	1		0.881		0.936
	1.00	4616.6		2.27	2		0.643		0.683
	1.50	6924.9		3.40	3		0.358		0.380
	2.00	9233.2		4.54	5		0.224		0.238

(b) $A_{wr}/A_f=2$

b_w/t_w	λ_f	l (mm)	a (mm)	l/a	n	M_Y (N · mm)	M_u/M_Y	g_w	$M_u/(g_w M_Y)$
61.8	0.13	847.2	2023.4	0.42	1	5720549273	1.177	1.13	1.046
	0.50	3258.4		1.61	2		1.030		0.915
	1.00	6516.8		3.22	3		0.770		0.684
	1.50	9775.3		4.83	5		0.495		0.440
	2.00	13033.7		6.44	6		0.328		0.292
162.0	0.13	657.5	2464.4	0.27	1	4618099497	1.060	1.00	1.060
	0.50	2528.7		1.03	1		0.948		0.948
	1.00	5057.5		2.05	2		0.641		0.641
	1.50	7586.2		3.08	3		0.361		0.361
	2.00	10115.0		4.10	4		0.237		0.237
280.8	0.13	425.8	2034.3	0.21	1	1694029544	0.971	0.90	1.083
	0.50	1637.8		0.81	1		0.845		0.943
	1.00	3275.6		1.61	2		0.589		0.657
	1.50	4913.4		2.42	2		0.317		0.354
	2.00	6551.2		3.22	3		0.205		0.229

(c) $A_{wr}/A_f=3$

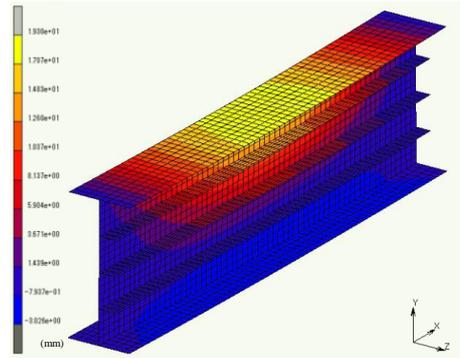
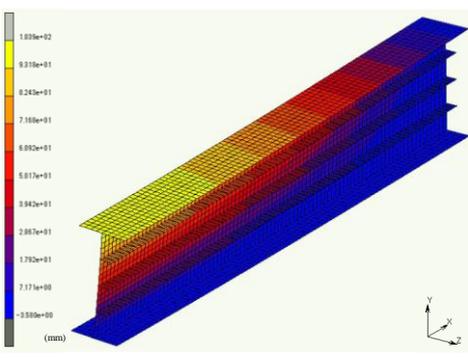
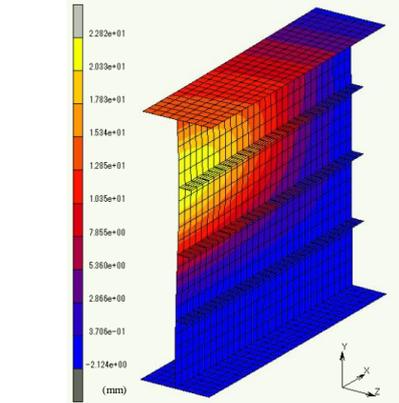
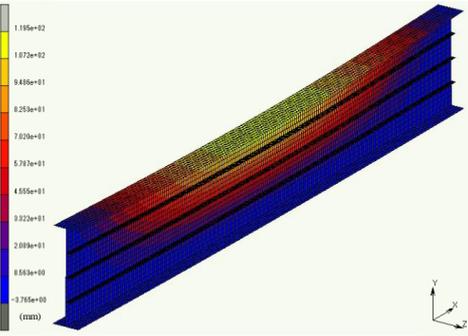
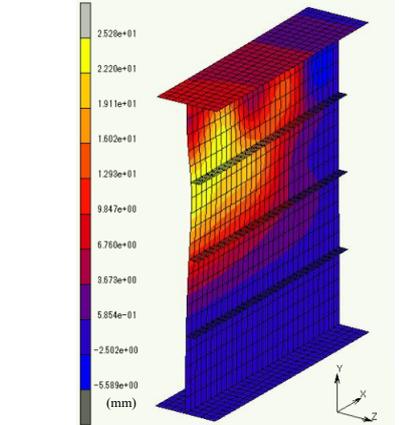
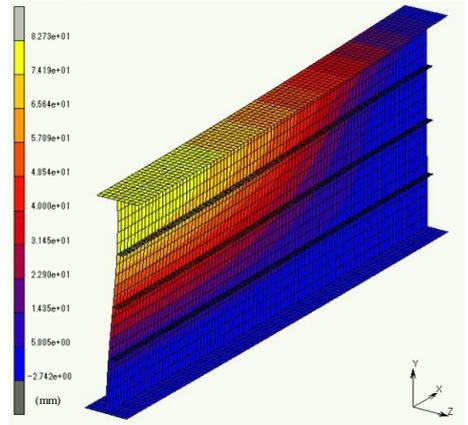
b_w/t_w	λ_f	l (mm)	a (mm)	l/a	n	M_Y (N · mm)	M_u/M_Y	g_w	$M_u/(g_w M_Y)$
61.8	0.13	695.6	2023.4	0.34	1	4284742501	1.220	1.17	1.046
	0.50	2675.3		1.32	1		1.056		0.905
	1.00	5350.6		2.64	3		0.784		0.672
	1.50	8025.9		3.97	4		0.522		0.447
	2.00	10701.2		5.29	5		0.355		0.304
162.0	0.13	538.6	2464.4	0.22	1	3460064733	1.071	1.00	1.071
	0.50	2071.6		0.84	1		0.951		0.951
	1.00	4143.2		1.68	2		0.625		0.625
	1.50	6214.9		2.52	3		0.348		0.348
	2.00	8286.5		3.36	3		0.224		0.224
280.8	0.13	348.6	2034.3	0.17	1	1269619845	0.951	0.86	1.103
	0.50	1340.7		0.66	1		0.824		0.956
	1.00	2681.4		1.32	1		0.499		0.579
	1.50	4022.1		1.98	2		0.296		0.343
	2.00	5362.8		2.64	3		0.193		0.224

(d) $A_{wr}/A_f=4$

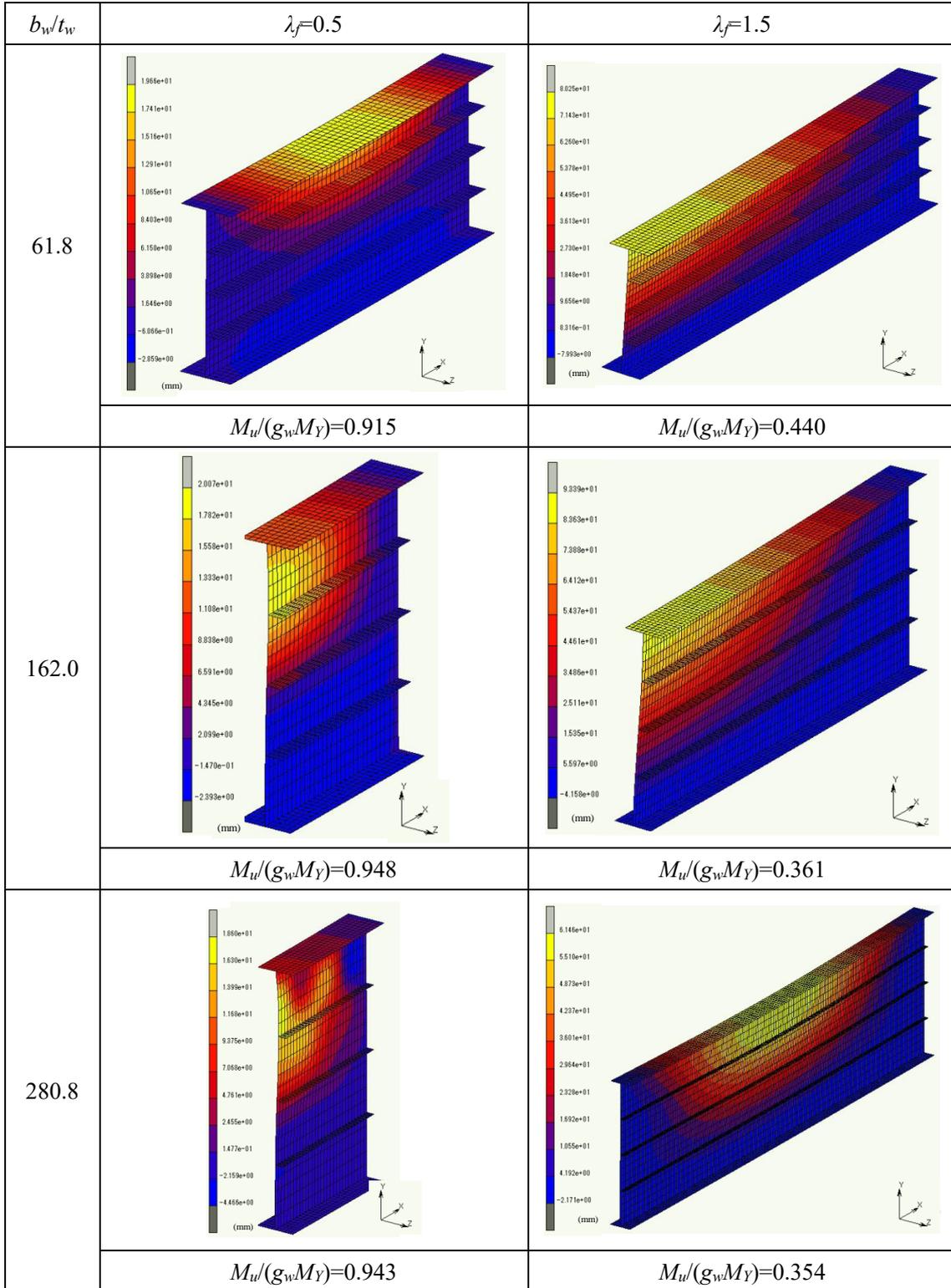
b_w/t_w	λ_f	l (mm)	a (mm)	l/a	n	M_Y (N · mm)	M_u/M_Y	g_w	$M_u/(g_w M_Y)$
61.8	0.13	605.2	2023.4	0.30	1	3568303123	1.253	1.20	1.044
	0.50	2327.6		1.15	1		1.080		0.900
	1.00	4655.2		2.30	2		0.809		0.674
	1.50	6982.9		3.45	3		0.550		0.458
	2.00	9310.5		4.60	5		0.387		0.332
162.0	0.13	467.8	2464.4	0.19	1	2882358100	1.060	1.00	1.060
	0.50	1799.4		0.73	1		0.948		0.948
	1.00	3598.7		1.46	1		0.548		0.548
	1.50	5398.1		2.19	2		0.336		0.336
	2.00	7197.5		2.92	3		0.225		0.225
280.8	0.13	302.7	2034.3	0.15	1	1058191727	0.932	0.83	1.117
	0.50	1164.1		0.57	1		0.805		0.965
	1.00	2328.2		1.14	1		0.472		0.566
	1.50	3492.3		1.72	2		0.283		0.339
	2.00	4656.5		2.29	2		0.189		0.226

付録C 終局時の桁の変形

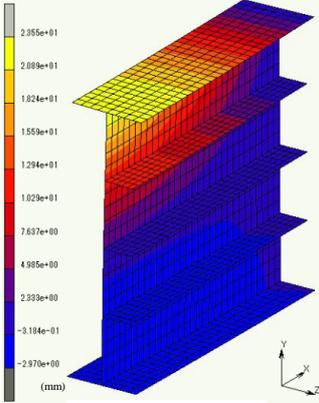
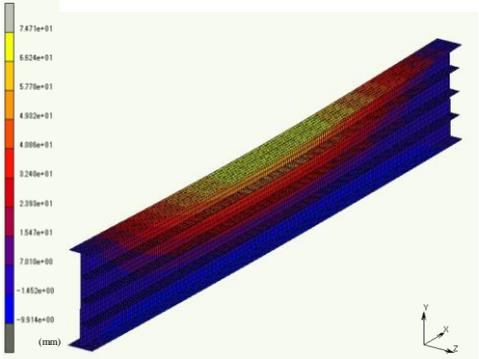
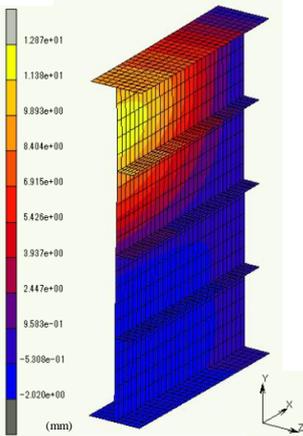
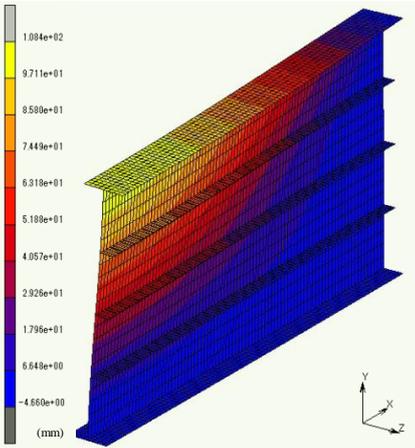
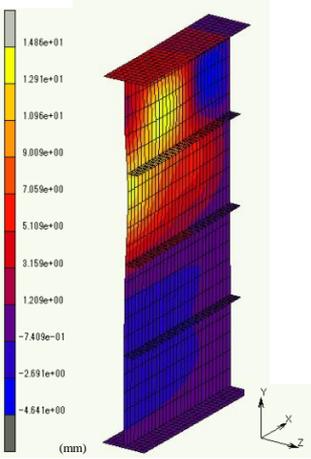
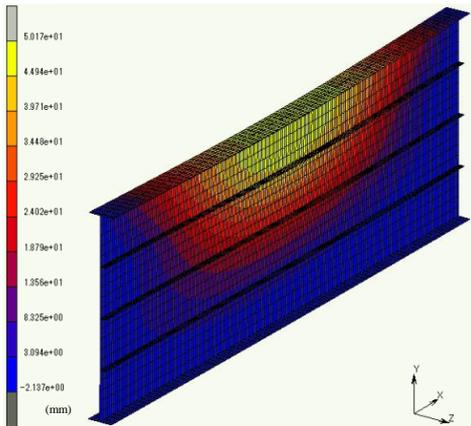
(a) $A_w/A_f=1$

b_w/t_w	$\lambda_f=0.5$	$\lambda_f=1.5$
61.8		
	$M_u/(g_w M_Y)=0.937$	$M_u/(g_w M_Y)=0.469$
162.0		
	$M_u/(g_w M_Y)=0.950$	$M_u/(g_w M_Y)=0.390$
280.8		
	$M_u/(g_w M_Y)=0.936$	$M_u/(g_w M_Y)=0.380$

(b) $A_w/A_f=2$



(c) $A_w/A_f=3$

b_w/t_w	$\lambda_f=0.5$	$\lambda_f=1.5$
61.8	 <p>$M_w/(g_w M_Y)=0.905$</p>	 <p>$M_w/(g_w M_Y)=0.447$</p>
162.0	 <p>$M_w/(g_w M_Y)=0.951$</p>	 <p>$M_w/(g_w M_Y)=0.348$</p>
280.8	 <p>$M_w/(g_w M_Y)=0.956$</p>	 <p>$M_w/(g_w M_Y)=0.343$</p>

(d) $A_w/A_f=4$ 