

せん断を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力

ALST 研究レポート 47

2016年9月

大阪大学大学院工学研究科

山中誠矢, 大倉一郎

概要

本研究では、最初に、せん断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 桁のせん断耐荷力式	・・・3
第 4 章 桁および端補剛材の断面寸法	・・・5
4.1 桁の断面寸法	・・・5
4.2 端補剛材の断面寸法	・・・6
第 5 章 FEM による弾塑性有限変位解析	・・・9
5.1 解析対象	・・・9
5.2 応力-ひずみ関係	・・・9
5.3 境界条件	・・・10
5.4 初期たわみ	・・・11
5.5 要素分割	・・・12
5.6 載荷方法	・・・13
第 6 章 桁のせん断耐荷力	・・・19
6.1 耐荷力曲線と解析値の比較	・・・19
6.2 桁のせん断耐荷力の特徴	・・・22
第 7 章 結論	・・・30
参考文献	・・・32
付録 A せん断を受ける A5083-O の長方形板の耐荷力	・・・33
付録 B 桁および端補剛材の断面寸法	・・・34
付録 C FEM 解析の数値データ [図 5.5]	・・・43
付録 D FEM 解析の数値データ [図 6.1 と 6.2]	・・・44
付録 E Δ^2 法によるせん断座屈応力の推定	・・・47

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および拡幅歩行者用アルミニウム床版が建設されるようになってきた¹⁾。さらに、2011年には道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋が建設された²⁾。道路橋用アルミニウム床版を支持する桁にもアルミニウム合金を適用することにより、軽量化による橋の耐震性の向上、および優れた耐食性による維持管理費の縮減を期待することができる。

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%耐力が125MPaの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%耐力が245MPaのアルミニウム合金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。したがって、図1.1に示すアルミニウム合金桁を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ために、桁としての強度が低下する。そこで、図1.2に示すようなT型断面の押出型材を摩擦攪拌接合によって突合せ接合し、ウェブの水平方向に、等間隔に補剛材が配置されたアルミニウム合金桁が提案された³⁾。

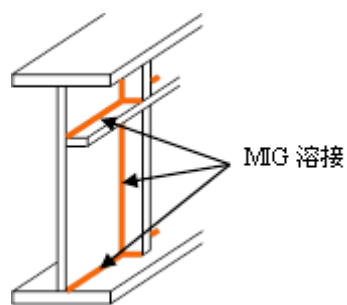


図1.1 従来のアルミニウム合金桁

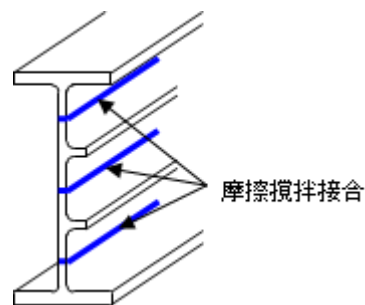


図1.2 縦補剛されたアルミニウム合金桁

アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針(案)⁴⁾が2015年3月に制定された。しかし、この指針では、曲げおよびせん断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。上記アルミニウム合金桁を設計するためには、これらの許容応力度が必要である。そこで、桁の曲げ圧縮許容応力度を与えるために、曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力が明らかにされた^{5),6)}。

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、せん断力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。

第2章 考慮するアルミニウム合金桁

本研究では、図 1.1 と 1.2 に示す桁のせん断耐荷力の基本を与える研究として、無補剛の桁を対象とする。

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撹拌接合により突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、摩擦撹拌接合を施すと、接合中心から各側で、最大 25mm の範囲で強度が低下する⁴⁾。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を母材のそれと同じにすることができる⁴⁾。

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

ここに、 t : 母材の板厚
 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

式(2.1)によって増厚された接合部を有する板のせん断耐荷力は、非接合板のそれより高くなる⁷⁾。したがって、A6061-T6 に対して非接合板のみを考慮する。

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、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。A5083-O の溶接部は強度低下を起こさない。しかも、溶接残留応力が板のせん断耐荷力にほとんど影響を与えないことが明らかにされている⁷⁾。したがって、A5083-O に対しても非接合板のみを考慮する。

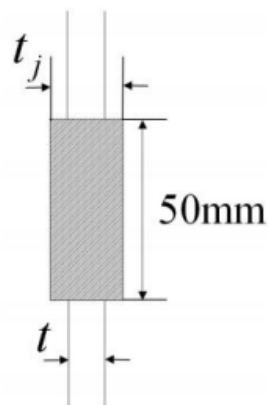


図 2.1 部分的に増厚された板

第3章 桁のせん断耐荷力式

図 3.1 を参照して、アルミニウム長方形板のせん断耐荷力が次式で与えられている⁷⁾.

$$\frac{\tau_u}{\tau_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ \frac{Q_1}{R} - \frac{Q_2}{R^2} & (R_1 \leq R \leq R_2) \\ a_1 \left(\frac{R_2}{R} \right)^{a_2} & (R_2 \leq R \leq 3) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$Q_1 = \frac{R_1^2 - 0.8R_2^2}{R_1 - R_2} \quad (3.2)$$

$$Q_2 = Q_1 R_1 - R_1^2 \quad (3.3)$$

$$\tau_{0.2} = \frac{\sigma_{0.2}}{\sqrt{3}} \quad (3.4)$$

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\tau_{0.2}}{E}} \frac{b}{t} \quad (3.5)$$

$$k = 5.34 + \frac{4}{(a/b)^2} \quad (1 \leq a/b) \quad (3.6)$$

ここに,	τ_u	: せん断を受ける長方形板の耐荷力
	$\tau_{0.2}$: 0.2%せん断耐力
	$\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力
	R	: 0.2%せん断耐力が用いられた幅厚比パラメータ
	R_1, R_2	: 幅厚比パラメータの値
	a_1, a_2	: 定数
	k	: せん断座屈係数
	μ	: ポアソン比 (=0.3)
	E	: ヤング率 (=70GPa)
	a	: 長方形板の長さ
	b	: 板幅
	t	: 板厚

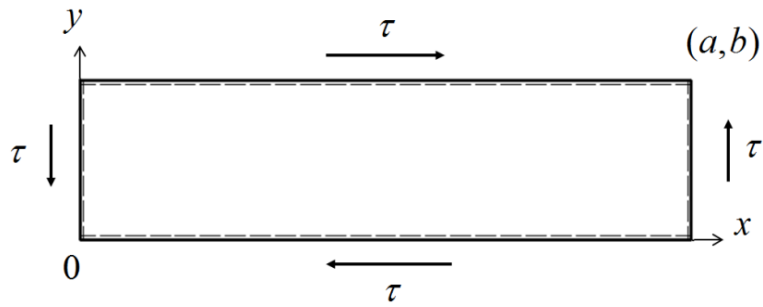


図 3.1 せん断を受ける長方形板

非接合板に対する $\sigma_{0.2}$, R_1 , R_2 , a_1 , a_2 の値を表 3.1 に示す⁷⁾.

表 3.1 $\sigma_{0.2}$, R_1 , R_2 , a_1 , a_2 の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	R_1	R_2	a_1	a_2
A6061-T6	245	0.60	1.09	0.80	0.81
A5083-O	125	0.53	0.92	0.80	0.76

式(3.2)と(3.3)によってそれぞれ与えられる Q_1 と Q_2 の値は、文献 7) の表 5 に示される値と同じ値をとる。文献 7) の式(12)で与えられるせん断耐荷力の適用範囲は $R \leq 2.0$ であったが、A6061-T6 に対して、この適用範囲が $R \leq 3.0$ に拡張できることが示された⁸⁾。さらに、A5083-O に対しても、この適用範囲が $R \leq 3.0$ に拡張できることを付録 A に示す。

フランジが桁のせん断耐荷力に寄与する割合は小さいと仮定して考慮しない。そして、ウェブのせん断耐荷力が式(3.1)の長方形板のせん断耐荷力で与えられると仮定すると、桁のせん断耐荷力は次式で与えられる。

$$\frac{V_u}{V_Y} = \frac{\tau_u}{\tau_{0.2}} \quad (3.7)$$

$$V_Y = \tau_{0.2} b_w t_w = \frac{\sigma_{0.2}}{\sqrt{3}} b_w t_w \quad (3.8)$$

- ここに、 V_u : 桁のせん断耐荷力
 V_Y : 桁のせん断耐荷力の上限值
 b_w : ウェブの高さ
 t_w : ウェブの板厚

ここで、式(3.5)と(3.6)に含まれる b と t を、それぞれ b_w と t_w に読み替える。

第4章 桁および端補剛材の断面寸法

4.1 桁の断面寸法

せん断を受ける桁は、実際には曲げも受ける。したがって、曲げ圧縮を受けるフランジが局部座屈しないような断面寸法をフランジに与える。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は次式で与えられる。

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

ここに、 β_{f1} : 自由突出板が $\sigma_{0.2}$ を維持する限界の幅厚比の値

R_{f1} : 自由突出板が $\sigma_{0.2}$ を維持する限界の幅厚比パラメータの値

A6061-T6とA5083-Oに対する R_{f1} と β_{f1} の値を表4.1に示す。 R_{f1} の値は文献9)で与えられる値である。本研究では、 β_{f1} よりさらに小さな値 β_f を片側のフランジの幅厚比に対して設定する。

表 4.1 $\sigma_{0.2}$, R_{f1} , β_{f1} , β_f の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	R_{f1}	β_{f1}	β_f
A6061-T6	245	0.6	6.28	6
A5083-O	125	0.4	5.82	5

図 4.1 を参照して、片側のフランジの板幅 b_f は次式で与えられる。

$$b_f = \beta_f t_f \quad (4.2)$$

ここに、 t_f : フランジの板厚

フランジの断面積 A_f は次式で与えられる。

$$A_f = t_f(2b_f + t_w) \quad (4.3)$$

ここに、 t_w : ウェブの板厚

式(4.2)を式(4.3)に代入して次式を得る。

$$2\beta_f t_f^2 + t_w t_f - A_f = 0 \quad (4.4)$$

ウェブ高 b_w を800mmとして、式(3.5)の幅厚比パラメータ R の任意の値に対して t_w を求め、ウェブの断面積 A_w を計算する。この A_w に対して決められたフランジの断面積 A_f と t_w を式(4.4)に代入して t_f を求める。 t_f を式(4.2)に代入して b_f を計算する。第6章で述べる、

FEM による弾塑性有限変位解析で考慮される桁の断面寸法を付録 B に示す。

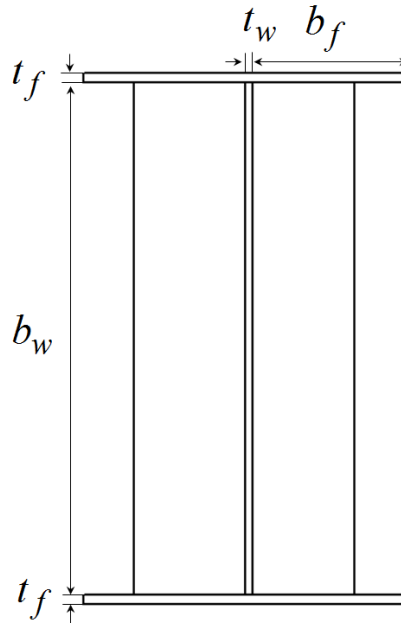


図 4.1 桁の断面

4.2 端補剛材の断面寸法

桁端に設けられる端補剛材の設計は、道路橋示方書¹⁰⁾に準拠し、支点反力を圧縮力として受ける柱として設計する。道路橋示方書では、柱としての有効断面積に端補剛材の両側 $12t_w$ までのウェブの断面積を考慮し、有効座屈長をウェブ高 b_w の $1/2$ としている。しかし、本研究では、安全側に立って、端補剛材の両側 $12t_w$ までのウェブの断面積を考慮せず、有効座屈長をウェブ高 b_w とする。

アルミニウム合金の柱部材に対する圧縮耐荷力は次式で与えられる⁴⁾。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_1) \\ c_0 + c_1\lambda + c_2\lambda^2 + c_3\lambda^3 + c_4\lambda^4 & (\lambda_1 \leq \lambda \leq 2) \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{r} \quad (4.6)$$

- ここに、 σ_u : 柱部材の圧縮耐荷力
 λ : 柱部材の細長比パラメータ
 l : 柱部材の有効座屈長
 r : 柱部材の断面二次半径
 λ_1 : λ の値

$c_0 \sim c_4$: 定数

アルミニウム合金 A6061-T6 と A5083-O に対する λ_1 と $c_0 \sim c_4$ の値を表 4.2 に示す⁴⁾.

表 4.2 λ_1 と $c_0 \sim c_4$ の値

アルミニウム 合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	λ_1	c_0	c_1	c_2	c_3	c_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 4.2 を参照して、端補剛材の断面二次半径 r は次式で与えられる.

$$r = \sqrt{\frac{I_s}{A_s}} \quad (4.7)$$

ここに、 I_s : 端補剛材の断面二次モーメント
 A_s : 端補剛材の断面積

I_s と A_s はそれぞれ次式で与えられる.

$$I_s = \frac{(2b_s + t_w)^3 t_s}{12} \quad (4.8)$$

$$A_s = (2b_s + t_w)t_s \quad (4.9)$$

ここに、 b_s : 端補剛材の板幅
 t_s : 端補剛材の板厚

式(4.8)と(4.9)を式(4.7)に代入して次式を得る.

$$r = \frac{2b_s + t_w}{2\sqrt{3}} \quad (4.10)$$

式(4.6)の l をウェブ高 b_w に置き換えた式に式(4.10)を代入して次式を得る.

$$\lambda = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{b_w}{2b_s + t_w} \quad (4.11)$$

図 4.2 に示すように、支点反力は桁のせん断耐荷力に等しいので、桁のせん断耐荷力が端補剛材の両端に圧縮力として作用する. 端補剛材に生じる圧縮応力 σ_s は次式で与えられる.

$$\sigma_s = \frac{V_u}{A_s} = \frac{V_u}{(2b_s + t_w)t_s} \quad (4.12)$$

さらに、この式に式(3.7)を代入し、式(3.8)を用いて次式を得る.

$$\sigma_s = \frac{\tau_u b_w t_w}{(2b_s + t_w)t_s} \quad (4.13)$$

せん断を受ける桁が終局強度に達したとき、端補剛材が終局強度に達しない条件は $\sigma_s \leq \sigma_u$ であるから、次式を得る.

$$\frac{\tau_u b_w t_w}{(2b_s + t_w)t_s} \leq \sigma_u \quad (4.14)$$

圧縮を受ける端補剛材が局部座屈しないような断面寸法を端補剛材に与える。したがって、前節で述べたフランジの場合と同様に、片側の端補剛材の幅厚比 β_s に対して、A6061-T6 と A5083-O に対してそれぞれ 6, 5 を与える。

片側の端補剛材の板幅 b_s は次式で与えられる。

$$b_s = \beta_s t_s \quad (4.15)$$

式(4.15)を式(4.11)と(4.14)にそれぞれ代入して次式を得る。

$$\lambda = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{b_w}{2\beta_s t_s + t_w} \quad (4.16)$$

$$\frac{\tau_u b_w t_w}{(2\beta_s t_s + t_w)t_s} \leq \sigma_u \quad (4.17)$$

ウェブの断面寸法 b_w と t_w に対して、式(3.1)より τ_u の値が与えられる。式(4.16)から分かるように、 λ は t_s を変数として有するので、 σ_u は t_s の関数となる。したがって、式(4.17)は t_s に関して非線形となるので、同式で等号が成立する場合に対して数値計算を行い、端補剛材の寸法を決定する。第 6 章で述べる、FEM による弾塑性有限変位解析で考慮される端補剛材の断面寸法を付録 B に示す。

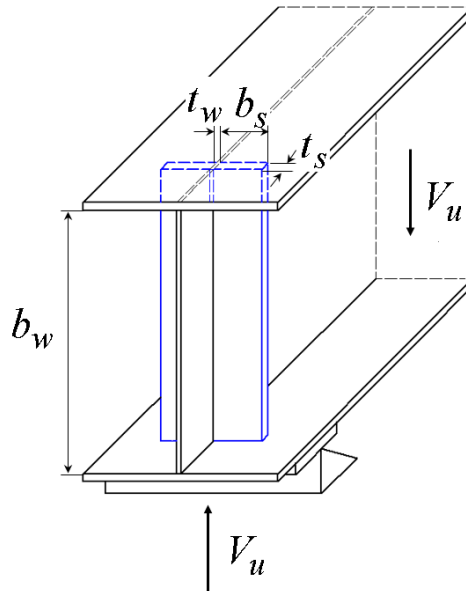


図 4.2 端補剛材の寸法

第5章 FEMによる弾塑性有限変位解析

5.1 解析対象

アルミニウム合金 A6061-T6 で桁が製作される場合，図 1.2 に示すように，中間垂直補剛材が設けられないので，縦横比 a/b_w が 1.0 以上のウェブを有する桁のせん断耐荷力を明らかにする必要がある．したがって，本研究では，A6061-T6 の桁のウェブの縦横比に対して 1.0, 3.0, 6.5 の三つを考慮する．他方，アルミニウム合金 A5083-O の桁においては，図 1.1 に示すように，中間垂直補剛材が設けられる．しかし，本研究では無補剛の桁を研究対象としているので，A5083-O の桁においても，A6061-T6 と同様に，ウェブの縦横比 a/b_w に対して 1.0, 3.0, 6.5 の三つを考慮する．

両端単純支持された桁に鉛直荷重を載荷（鉛直方向載荷と呼ぶ）することによって桁にせん断力を生じさせる場合，桁が長くなると，曲げモーメントによって桁が終局状態に達し，せん断力によって桁は終局状態に達しない．そこで，図 5.1 に示すように，支点間の下フランジとウェブが交差する辺の水平方向の変位を拘束し，支点間の上フランジとウェブが交差する辺を水平方向に強制変位させることによってせん断力を導入する（水平方向載荷と呼ぶ）．水平方向載荷では曲げモーメントが生じないので，長い桁のせん断耐荷力を調べることができる．縦横比 a/b_w が 1.0 のウェブを有する桁に対して，鉛直方向載荷と水平方向載荷によるせん断耐荷力の違いを 5.6 節で述べる．

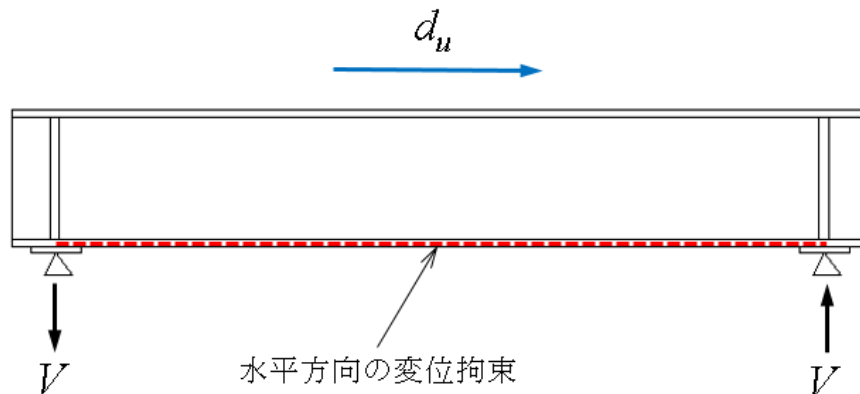


図 5.1 解析対象

5.2 応力-ひずみ関係

アルミニウム合金の応力-ひずみ関係は，次式に示す，Ramberg-Osgood 式によって与えられる¹¹⁾．

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & (\sigma \leq \sigma_{0.2}) \\ \sigma = \sigma_{0.2} & (\sigma > \sigma_{0.2}) \end{cases} \quad (5.1)$$

ここに、 σ と ε : それぞれ応力とひずみ
 E : ヤング係数 (=70GPa)
 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力
 n : ひずみ硬化パラメータ

アルミニウム合金 A6061-T6 と A5083-O の 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ とひずみ硬化パラメータ n の値を表 5.1 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を施すことによって得られる非超過確率 5%に対する値である.

表 5.1 0.2%耐力とひずみ硬化パラメータの値

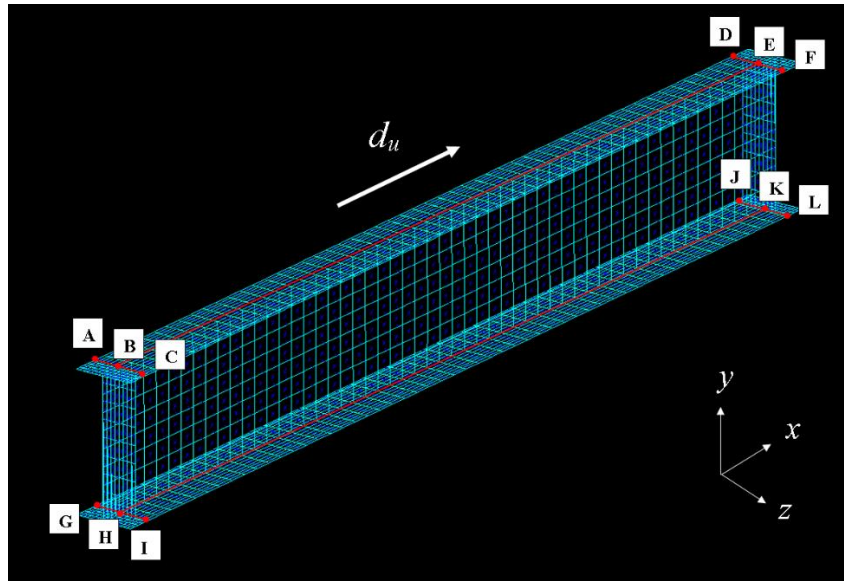
アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	n
A6061-T6	245	29.1
A5083-O	125	5.3

5.3 境界条件

有限要素法解析における境界条件を表 5.2 に示す. 0 と 1 は, それぞれ自由と拘束を表す. 支承上の辺 GI と JL に対して x , y , z 軸方向の変位を拘束し, ウェブと上下フランジが交差する辺 BE と HK は横移動しないように z 軸方向の変位を拘束する. さらに, 辺 HK の x 軸方向の変位を拘束し, 辺 BE に強制変位 d_u を x 軸方向に与える. 辺上の回転角は自由とする.

表 5.2 境界条件

	変位		
	x 軸方向	y 軸方向	z 軸方向
辺 BE	強制変位 d_u	0	1
辺 HK	1	0	1
辺 GI, 辺 JL	1	1	1



5.4 初期たわみ

図 5.2 を参照して、ウェブの面外方向の初期たわみ w_0 に対して次式を仮定する。

$$w_0 = w_{0\max} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_w + t_f}\right) \quad (5.2)$$

ここに、 $w_{0\max}$: 最大初期たわみ

m : ウェブの長さ方向の初期たわみモード数

有限要素法解析における部材寸法は板厚の中央面を基準として設定される。最大初期たわみ $w_{0\max}$ に対して、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）⁴⁾で規定される製作精度 $b_w/250$ を与える。ウェブの長さ方向の初期たわみモード数 m は、 $a/b_w=1.0, 3.0, 6.5$ に対して、それぞれ 1, 2, 5 とする。これらの値は、縦横比 a/b_w が 1.0, 3.0, 6.5 の長方形板のせん断座屈波形のモード数である⁷⁾。

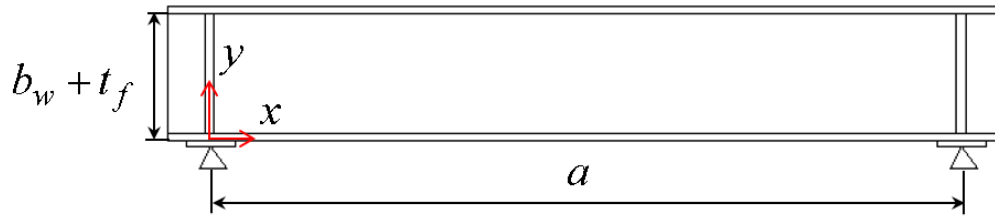
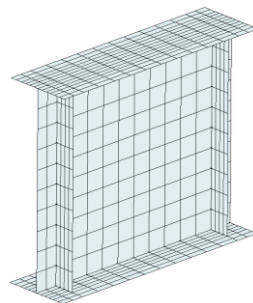


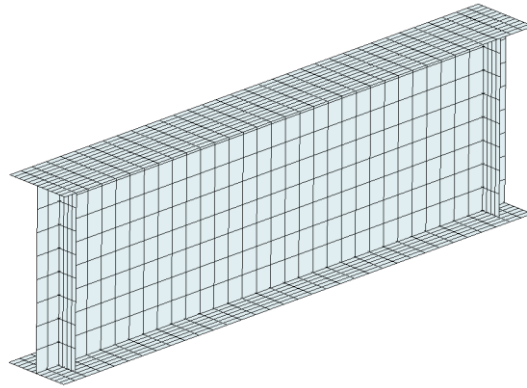
図 5.2 ウェブの初期たわみ

5.5 要素分割

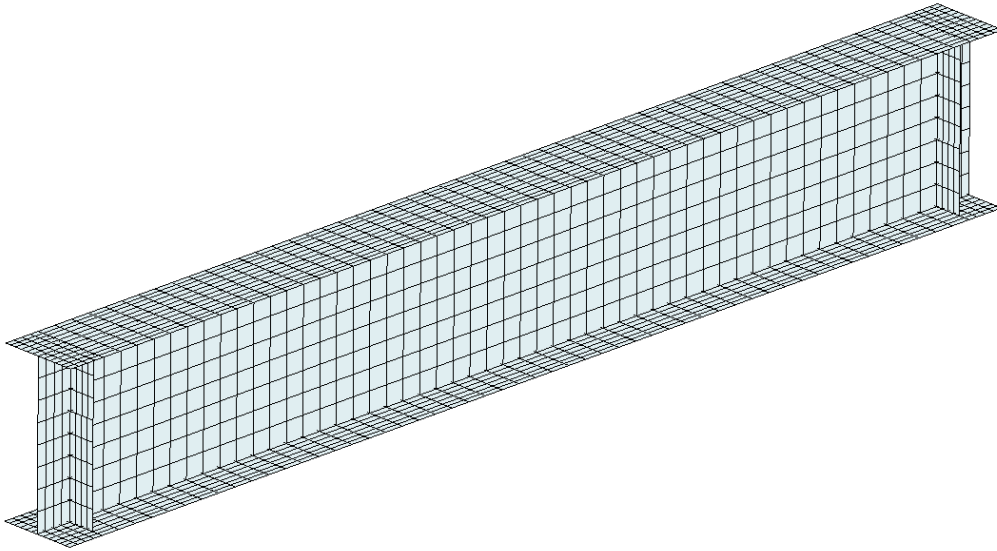
汎用有限要素法解析プログラム MARC¹²⁾を用いて弾塑性有限変位解析を行う。有限要素として 8 節点シェル要素 (MARC における要素番号 22) を用いる。せん断を受けるアルミニウム長方形板に対して、板幅方向の要素分割数を、1.0~1.9 の縦横比 a/b に対して 10 等分割、2.0 以上の縦横比 a/b に対して 8 等分割することにより十分な精度の解析値が得られることが示されている⁷⁾。したがって、ウェブに対して、各有限要素の形状を正方形とし、ウェブの縦横比 a/b_w が 1.0 の桁に対して、ウェブの高さ方向を 10 等分割、ウェブの縦横比 a/b_w が 3.0 と 6.5 の桁に対して 8 等分割する。圧縮を受けるフランジに対して、フランジの全幅方向を 4 等分割以上とすれば十分な精度の解析値が得られることが示されている⁵⁾。そこで、フランジと端補剛材に共有節点を持たせることを考慮して、フランジの全幅方向を 8 から 12 の間で等分割する。端補剛材は圧縮を受けるフランジと同様な部材とみなせるので、ウェブで区切られた片側の端補剛材の板幅方向を 4 から 6 の間で等分割する。要素分割の一例を図 5.3 に示す。端補剛材から外側の張出しの長さを $12t_w$ としている。



(a) $a/b_w=1.0$



(b) $a/b_w=3.0$



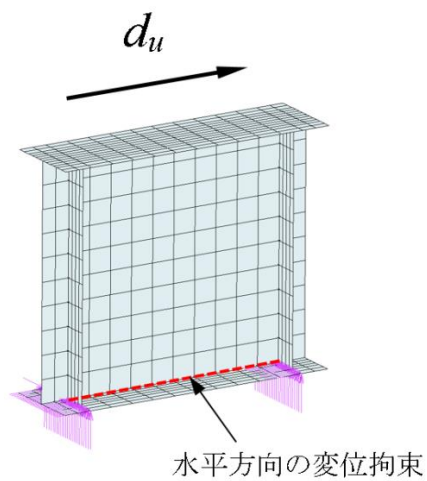
(c) $a/b_w=6.5$

図 5.3 要素分割

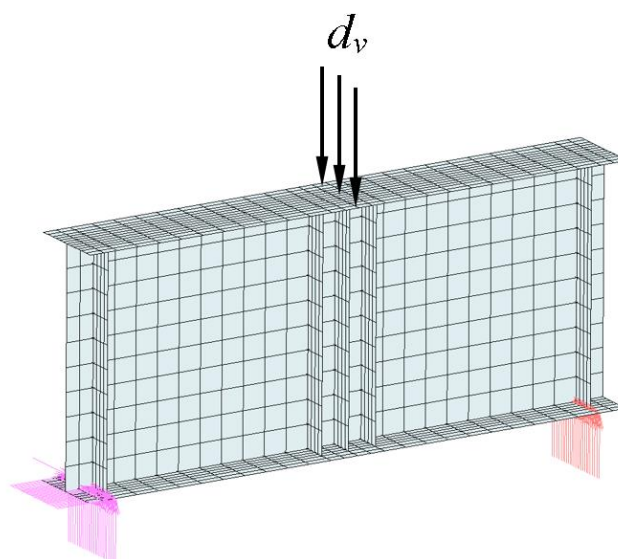
5.6 荷重方法

縦横比 a/b_w が 1.0 のウェブを有する桁に対して、鉛直方向荷重と水平方向荷重によるせん断耐荷力の違いを調べる。図 5.4(a) に示す水平方向荷重によるせん断力の与え方は 5.3 節で与えられている。図 5.4(b) に示す鉛直方向荷重では、中間垂直補剛材を中央に設け、縦横比が 1 のウェブパネル 2 枚から成る。水平方向荷重で仮定された、縦横比 a/b_w が 1.0 に対する初期たわみを 2 枚のウェブパネルに逆対称で与える。これに対する境界条件を表 5.3 に示す。0 と 1 は、それぞれ自由と拘束を表している。支承上の辺 GI の x , y , z 軸方向の変位を拘束し、辺 JL の y , z 軸方向の変位を拘束する。さらに、上下フランジの辺 BE と HK の z 軸方向の変位を拘束し、辺 MN を鉛直下向きに強制変位させることにより、桁にせ

せん断力を生じさせる。辺上の回転角は自由とする。



(a) 水平方向載荷

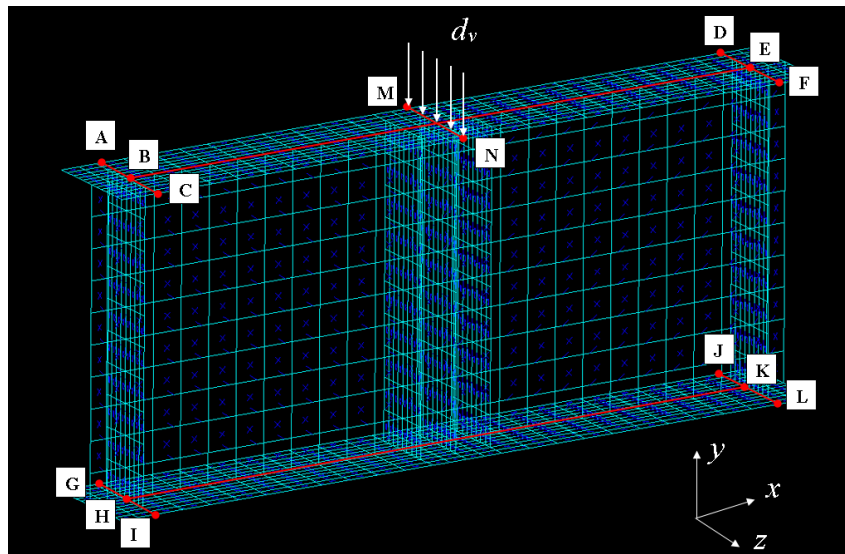


(b) 鉛直方向載荷

図 5.4 載荷方法

表 5.3 境界条件

	変位		
	x 軸方向	y 軸方向	z 軸方向
辺 MN	0	強制変位 d_v	0
辺 BE, 辺 HK	0	0	1
辺 GI	1	1	1
辺 JL	0	1	1

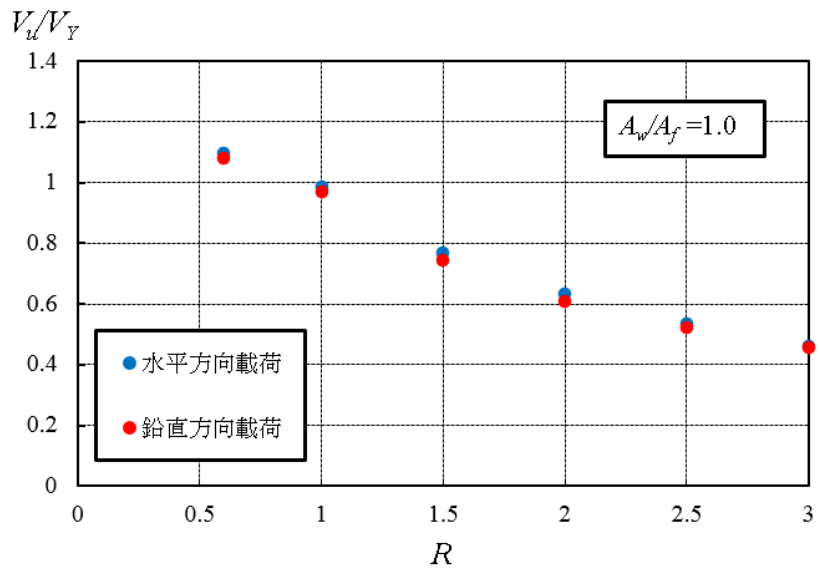


二つの荷重方法に対する桁のせん断耐荷力の比較を図 5.5 に示す. 数値データを付録 C に示す. 図 5.5 (a) と (b) は, それぞれアルミニウム合金 A6061-T6 と A5083-O に対する結果である. ウェブとフランジの断面積比 A_w/A_f は 1.0 である. せん断耐荷力 V_u は, FEM 解析で支点反力の最大値である. V_Y は, 式(3.8)で与えられる, 桁のせん断耐荷力の上限值である. 横軸の R は, 式(3.5)で定義される幅厚比パラメータである. 鉛直方向荷重によるせん断耐荷力は, 曲げモーメントの影響を受けるため, 水平方向荷重によるせん断耐荷力よりわずかに低い.

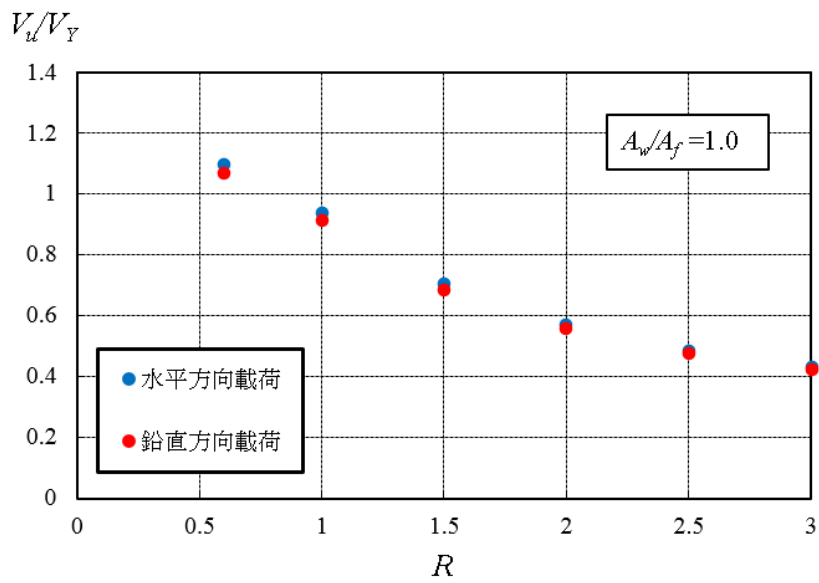
アルミニウム合金が A6061-T6 で $R=1.5$ の桁に対して, 最大荷重に達したときの水平方向荷重と鉛直方向荷重に対するウェブの面外変形を図 5.6 に示す. 両者のウェブの面外変形は同じ様な形状を示している.

さらに, 同桁に対して, 水平方向荷重と鉛直方向荷重に対する, 荷重とウェブ中心の面外変位の関係を図 5.7 に示す. 鉛直方向荷重による面外変位が水平方向荷重による面外変位より大きい, 最大荷重に達した後は, 両者の変位は同じになる.

以上より, 水平方向荷重によって得られる桁のせん断耐荷力は, 鉛直方向荷重によって得られる桁のせん断耐荷力を適切に表していると言える.

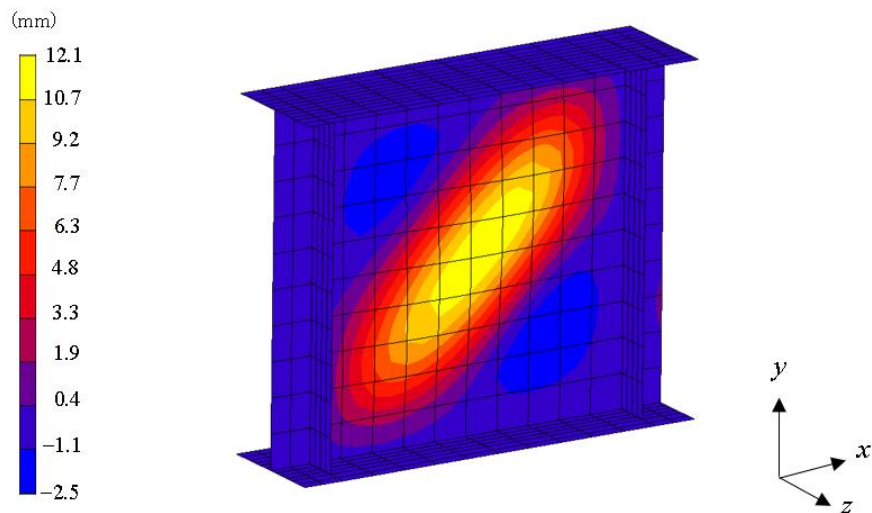


(a) A6061-T6

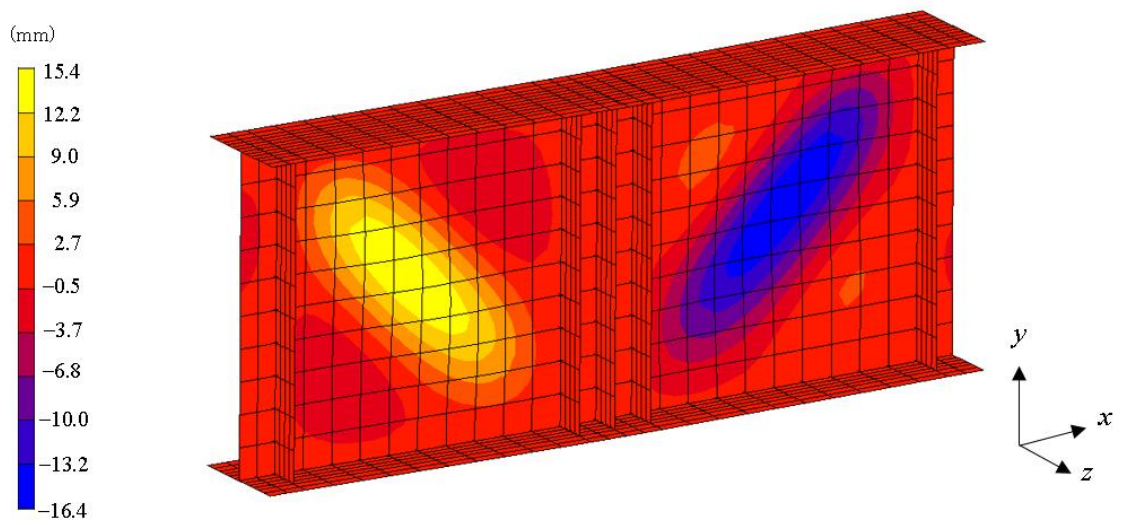


(b) A5083-O

図 5.5 桁のせん断耐荷力の比較



(a) 水平方向載荷



(b) 鉛直方向載荷

図 5.6 ウェブの面外変形 [A6061-T6, $R=1.5$]

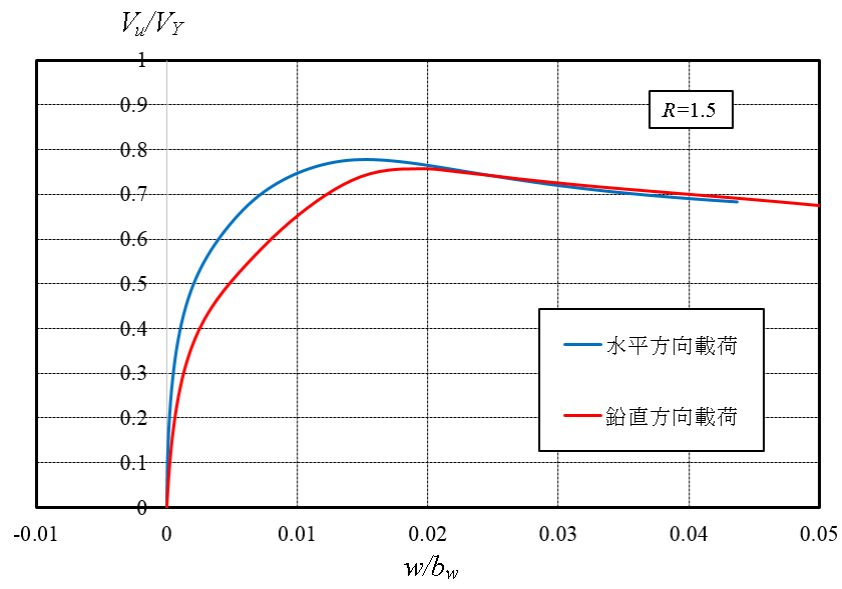


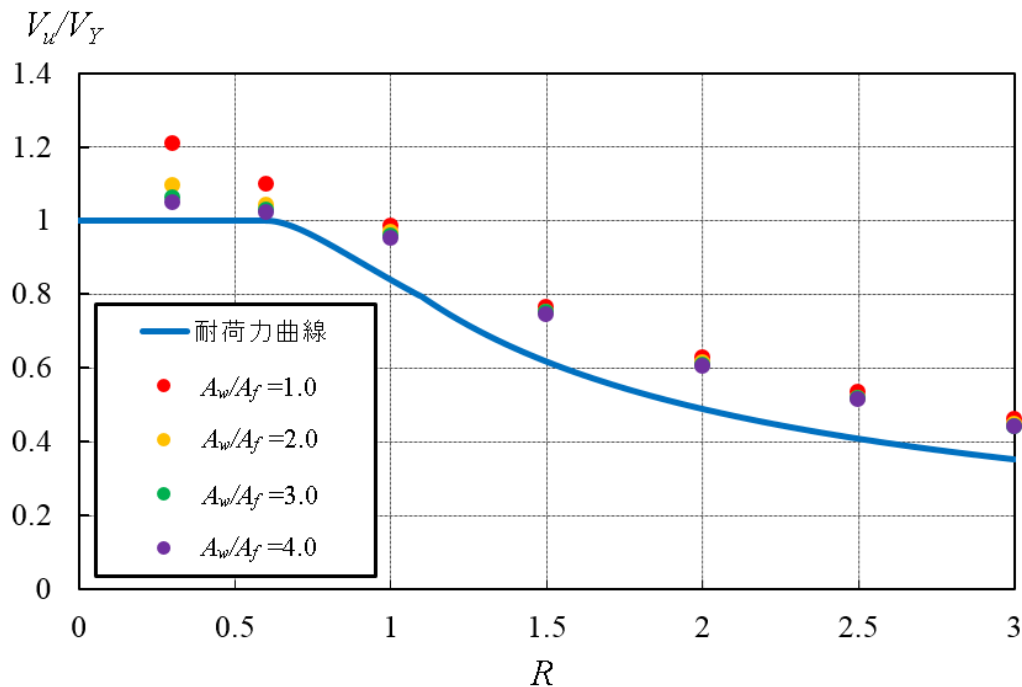
図 5.7 荷重と面外変位の関係 [A6061-T6, $R=1.5$]

第6章 桁のせん断耐荷力

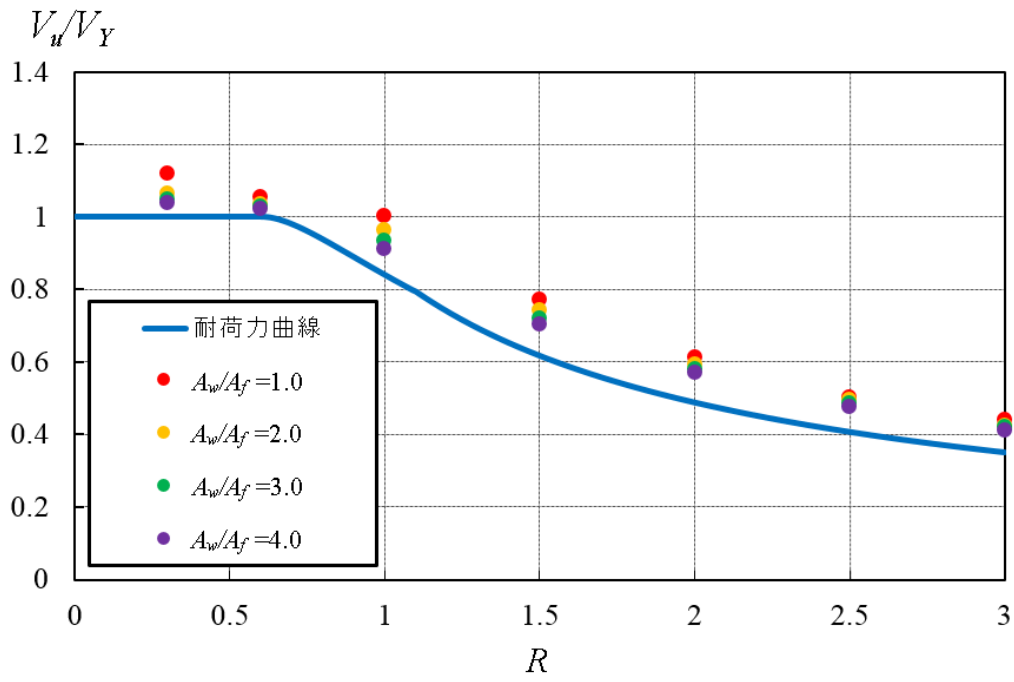
6.1 耐荷力曲線と解析値の比較

耐荷力曲線と解析値の比較を、アルミニウム合金 A6061-T6 と A5083-O に対して、それぞれ図 6.1 と 6.2 に示す。数値データを付録 D に示す。耐荷力曲線は式(3.7)で与えられる。各図から分かるように、解析値は耐荷力曲線より上にプロットされている。すなわち、式(3.7)が与える耐荷力は解析値を安全側で評価している。

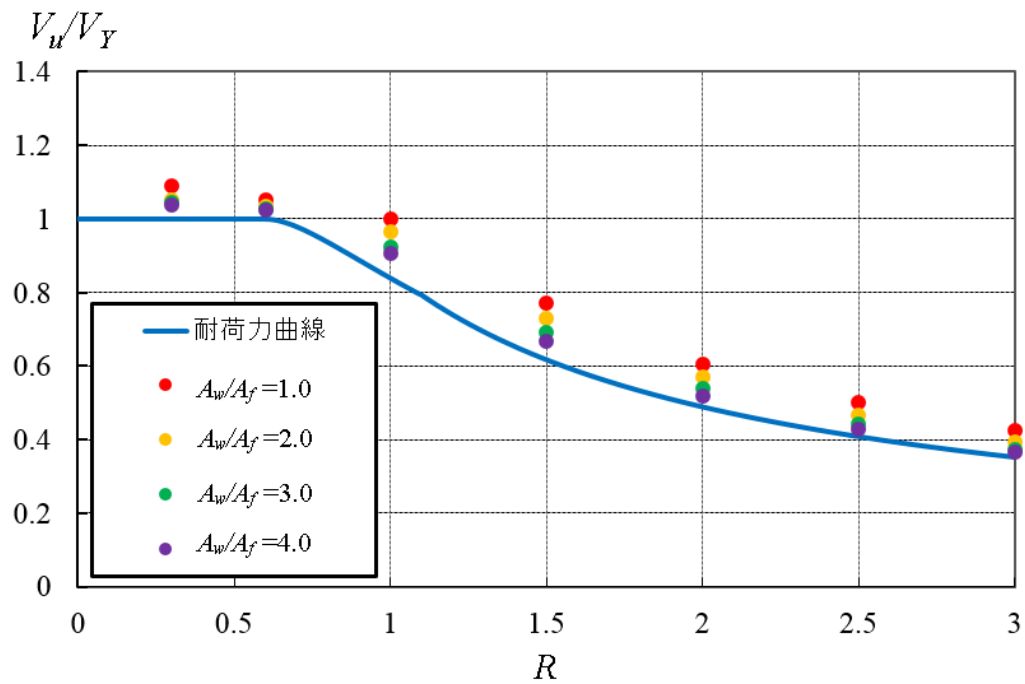
図 6.1(a) と 6.2(a) に示すように、 $a/b_w=1.0$ の場合、解析値は耐荷力曲線よりかなり上に位置し、ウェブとフランジの断面積比 A_w/A_f が大きくなっても解析値の低下はわずかである。しかし、図 6.1(b) と 6.2(b) に示すように、 $a/b_w=3.0$ の場合、 A_w/A_f が大きくなるに従って解析値は低下し、図 6.1(c) と 6.2(c) に示すように、 $a/b_w=6.5$ の場合、その低下の度合いはさらに大きくなり、解析値は耐荷力曲線に近づく。すなわち、ウェブの縦横比 a/b_w が大きくなるに従って、ウェブとフランジの断面積比 A_w/A_f の増加に対する耐荷力の低下の度合いが大きくなる。ウェブの縦横比 a/b_w およびウェブとフランジの断面積比 A_w/A_f に対する耐荷力のこのような特徴を次節でさらに詳細に調べる。



(a) $a/b_w=1.0$

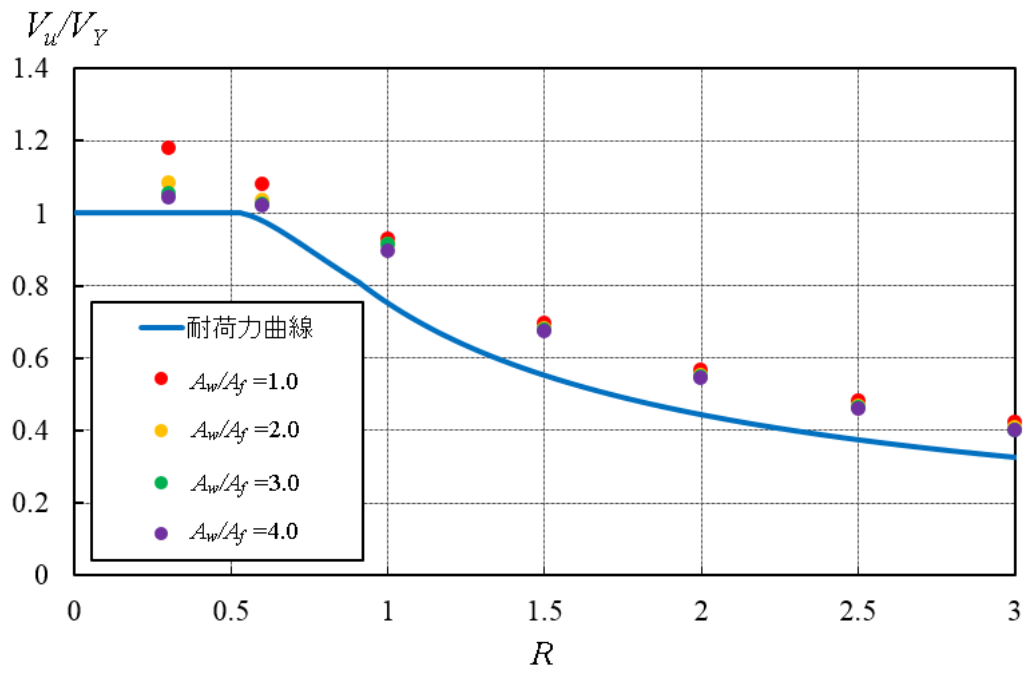


(b) $a/b_w = 3.0$

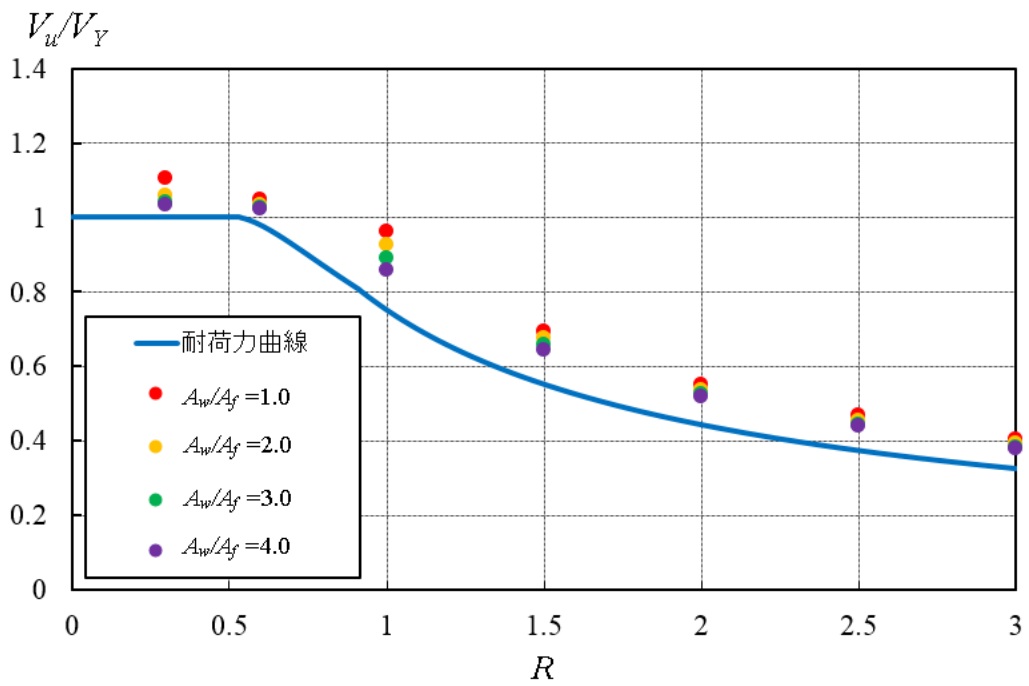


(c) $a/b_w = 6.5$

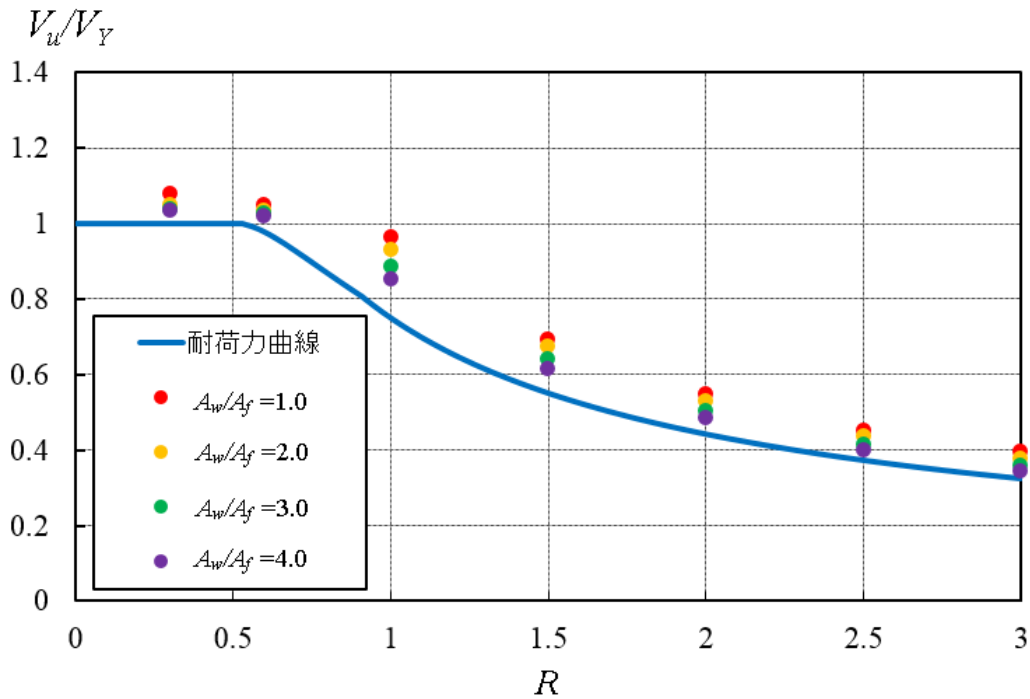
図 6.1 V_u/V_Y と R の関係 [A6061-T6]



(a) $a/b_w=1.0$



(b) $a/b_w=3.0$



(c) $a/b_w=6.5$

図 6.2 V_u/V_Y と R の関係 [A5083-O]

6.2 桁のせん断耐力の特徴

アルミニウム合金が A6061-T6 で、ウェブの R が 1.5 の桁のせん断力とウェブ中心の面外変位の関係を図 6.3 に示す。図 6.3(a) と (b) は、それぞれウェブの縦横比 a/b_w が 1.0 と 6.5 に対する結果である。ウェブとフランジの断面積比 A_w/A_f は 1.0 である。さらに両図には、式(5.2)において最大初期たわみ $w_{0\max}$ が $b/20000$ に対する結果も示してある。面外変位 w はウェブの板幅 b_w で無次元化されている。

せん断を受ける桁の耐力は次の三つで構成される¹³⁾。

$$V_u = V_{cr} + V_t + V_f \quad (6.1)$$

ここに、 V_u : 桁のせん断耐力

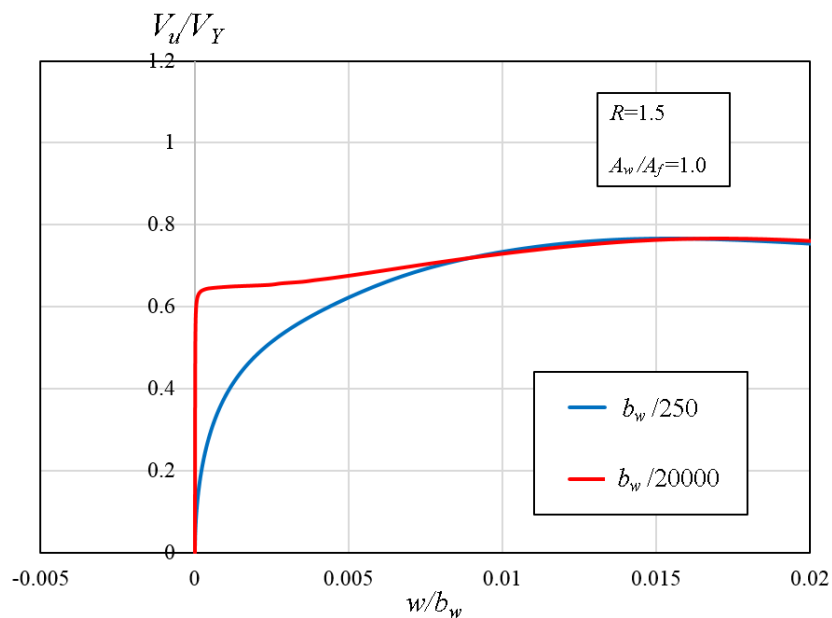
V_{cr} : ウェブのせん断座屈強度によって負担されるせん断力

V_t : ウェブの斜張力場作用によって負担されるせん断力

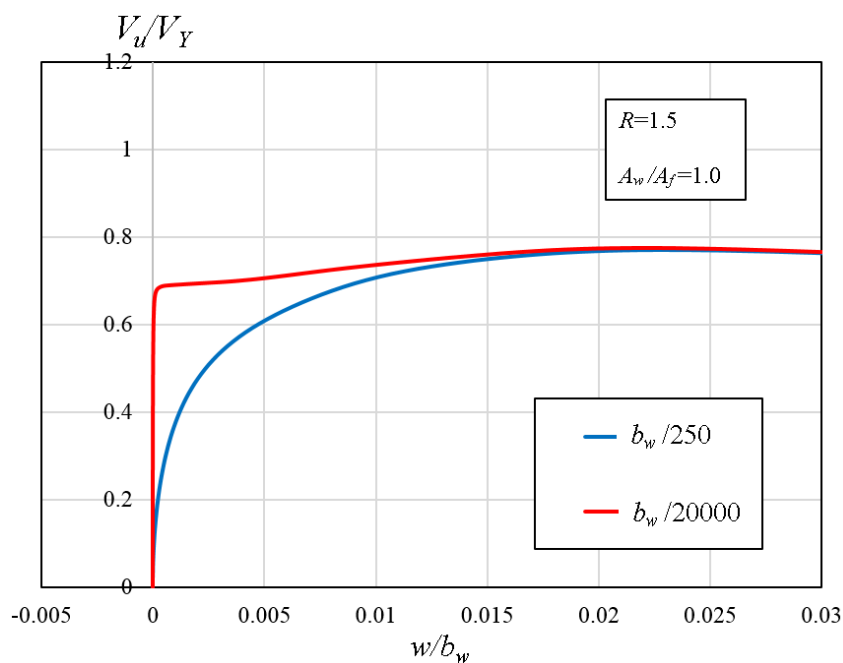
V_f : フランジと垂直補剛材で囲まれた枠組みが崩壊メカニズムを形成することによって負担されるせん断力

図 6.3 の各図に示すように、最大初期たわみ $w_{0\max}$ が $b/250$ と $b/20000$ に対するせん断耐力は同じである。 $w_{0\max}=b/250$ に対する $V_u/V_Y-w/b_w$ 関係から、ウェブのせん断座屈強度によって負担されるせん断力 V_{cr} を推定することはできない。しかし、 $w_{0\max}=b/20000$ 対

する $V_u/V_Y-w/b_w$ 関係は、ある V_u/V_Y の値で w/b_w が急激に増加するので、 V_{cr} を推定することができる。さらに、付録 E に示す Δ^2 法¹⁴⁾ によって V_{cr} の推定精度を上げることができる。



(a) $a/b_w=1.0$

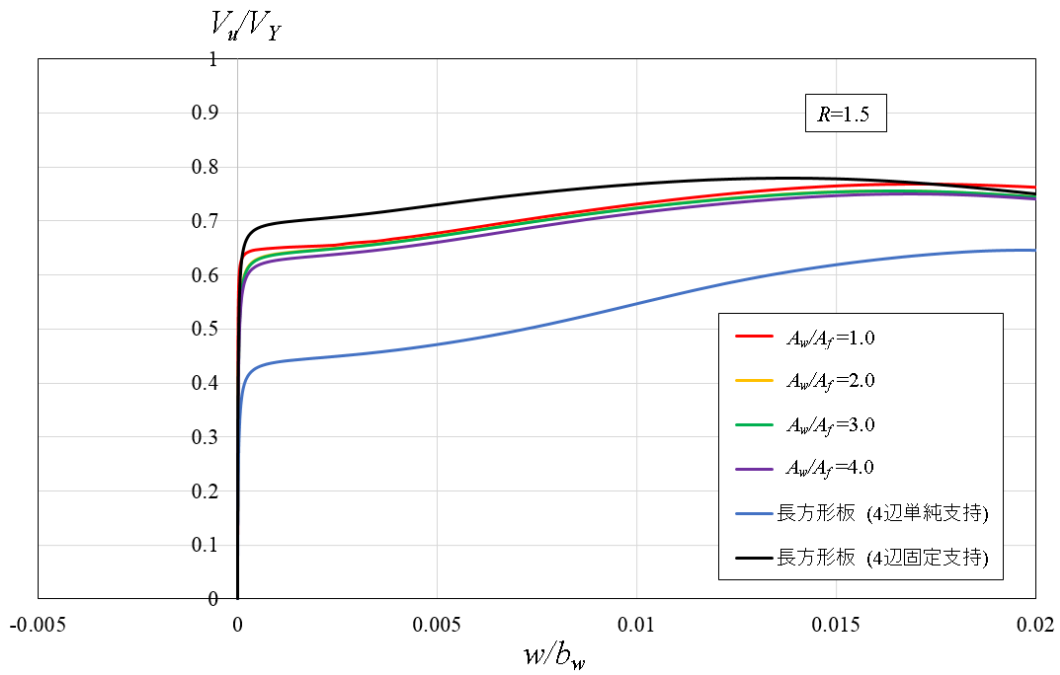


(b) $a/b_w=6.5$

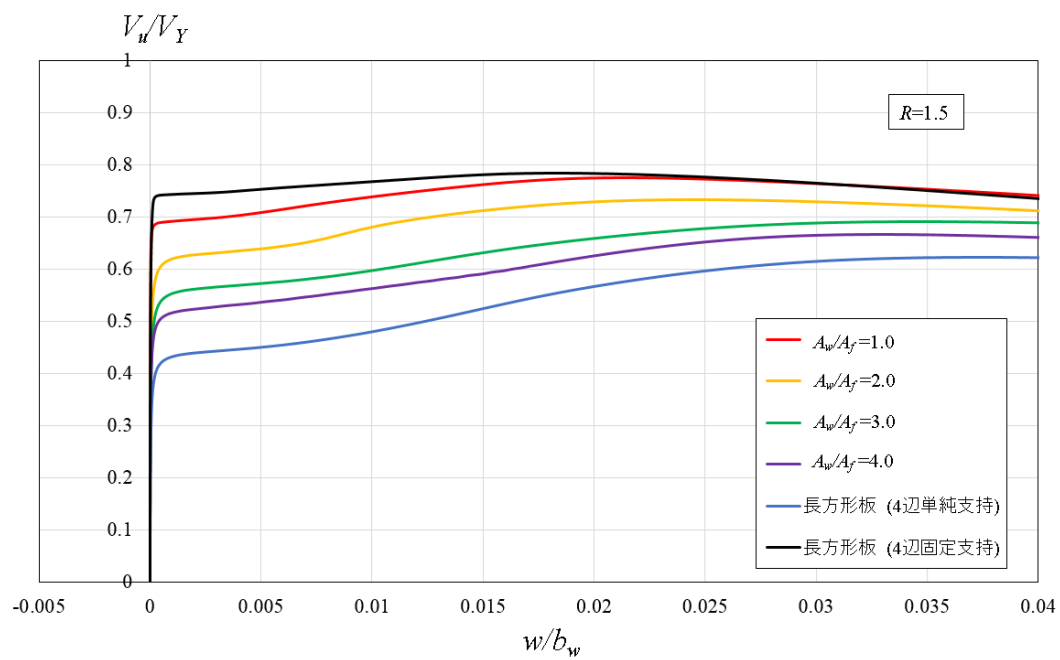
図 6.3 最大初期たわみの大きさが $V_u/V_Y-w/b_w$ 関係に与える影響

$w_{0\max}=b/20000$ に対する前述のアルミニウム合金桁の荷重とウェブの面外変位の関係を図 6.4 に示す。図に示すように、ウェブとフランジの断面積比 A_w/A_f を変化させている。 $a/b_w=6.5$ で $A_w/A_f=1.0$ の場合、桁が終局強度に達したとき、および終局強度に対して 10%ほど強度が低下したときのウェブの面外変形を図 6.5 に示す。桁が終局強度に達するまでは、ウェブ中心、すなわち $(0.5a, 0.5b_w)$ の位置の面外変位が最大となるが、桁が終局強度に達した後は、 $(0.6a, 0.5b_w)$ の位置のウェブの面外変位が最大となる。他方、これ以外の場合では、図 6.6 に示すように、桁が終局強度に達すまで、およびその後もウェブ中心の面外変位が最大となる。したがって、図 6.4 では、 $a/b_w=6.5$ で $A_w/A_f=1.0$ の場合のみ、 $(0.6a, 0.5b_w)$ の位置のウェブの面外変位を示し、他は、ウェブ中心の面外変位を示している。

さらに、図 6.4 には、面外方向に 4 辺単純支持された長方形板および面外方向に 4 辺固定支持された長方形板の荷重とウェブの面外変位の関係も示してある。両長方形板の面内方向の境界条件を表 6.1 に示す。この境界条件は文献 7) で与えられたものと同じである。 u と v はそれぞれ x 軸方向と y 軸方向の変位を表している。0 と 1 は、それぞれ自由と拘束を表している。この境界条件では、フランジと端補剛材の伸び剛性は大きいと仮定し、各辺の伸び変形をゼロとし、さらに、フランジと端補剛材の板曲げ剛性は小さいと仮定し、各辺の長さ方向に対して直角方向の変位を自由としている。

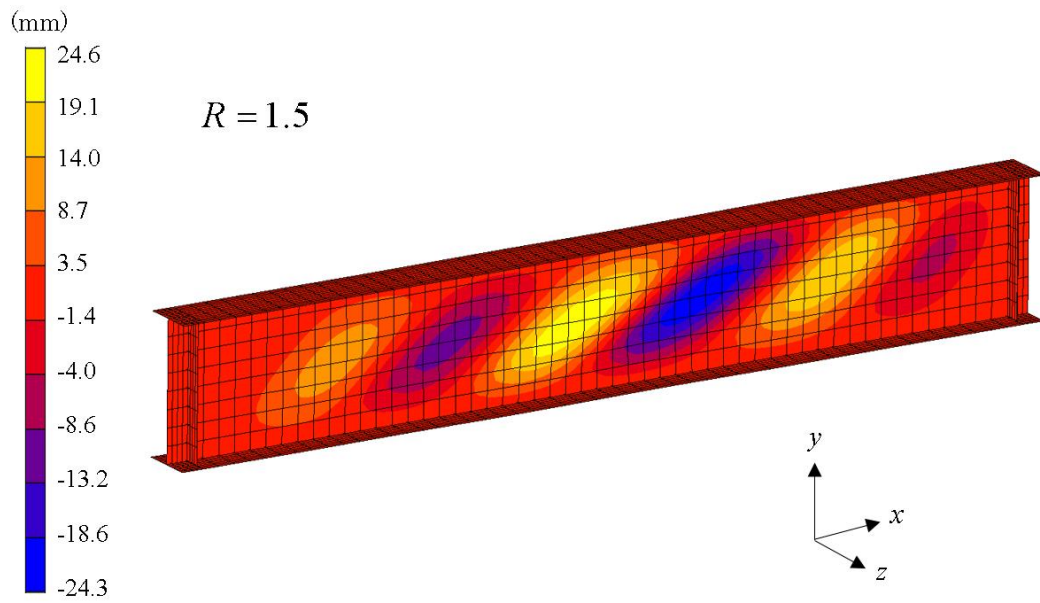


(a) $a/b_w=1.0$

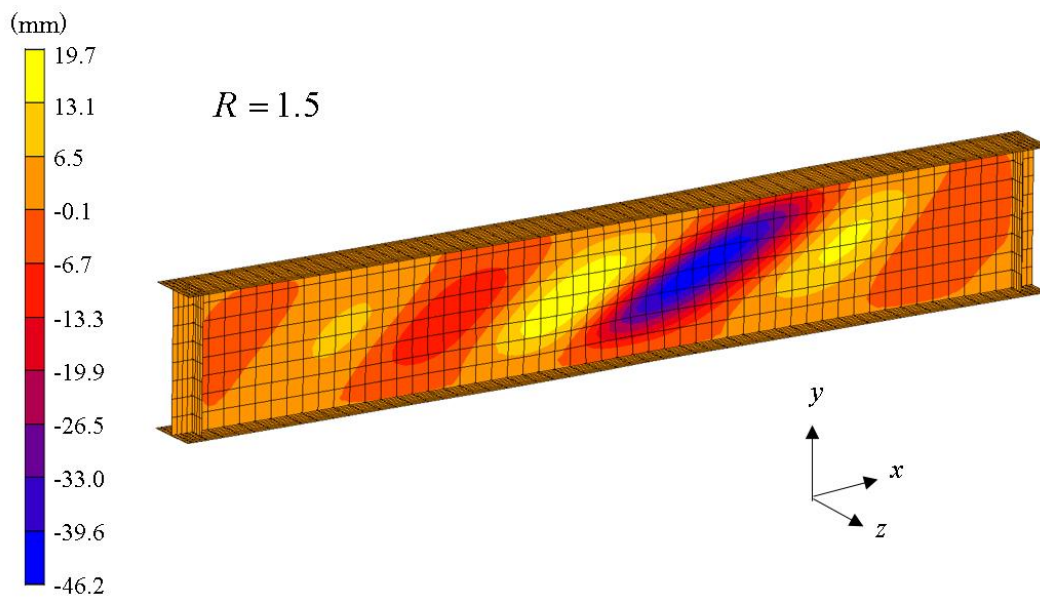


(b) $a/b_w=6.5$

図 6.4 $V_u/V_Y-w/b_w$ の関係 [A6061-T6]

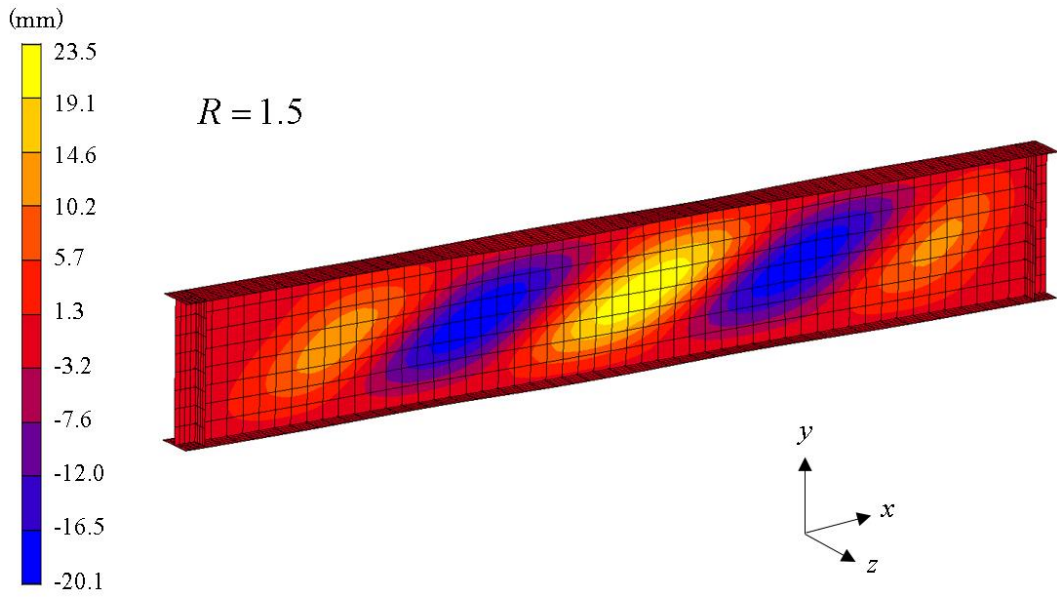


(a) $Vu/V_y=0.78$ (終局時)

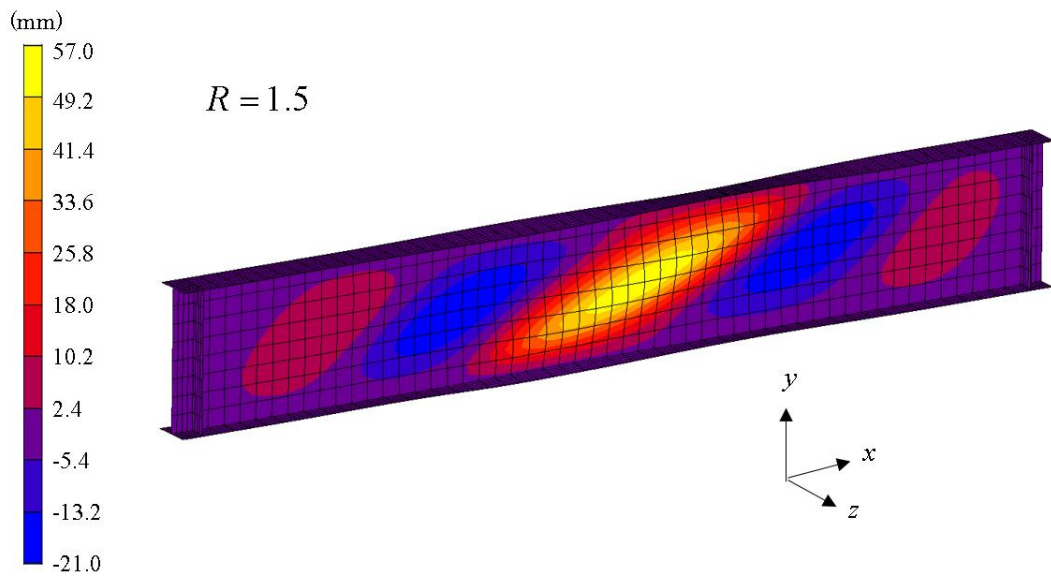


(b) $Vu/V_y=0.70$ (終局後)

図 6.5 $a/b_w=6.5$ で $A_w/A_f=1.0$ の場合に対する終局時とその後のウェブの面外変形



(a) $Vu/V_Y=0.73$ (終局時)



(b) $Vu/V_Y=0.66$ (終局後)

図 6.6 $a/b_w=6.5$ で $A_w/A_f=2.0$ の場合に対する終局時とその後のウェブの面外変形

表 6.1 せん断を受ける長方形板の面内方向の境界条件

辺	u	v
$x=0$	0	1
$x=a$	0	1
$y=0$	1	0
$y=b$	強制変位 d_u	0

図 6.4 の荷重とウェブの面外変位の関係から得られる V_{cr}/V_u および $(V_u - V_{cr})/V_u$ の値を表 6.2 に示す. ウェブのせん断座屈強度によって負担されるせん断力 V_{cr} は d^2 法によって推定されている. V_u は桁のせん断耐荷力であり, V_Y は式(3.8)で定義される桁のせん断耐荷力の上限値である. 式(3.5)の幅厚比パラメータ R のせん断座屈係数 k は縦横比 a/b_w によって変わるため, $R=1.5$ に対して, $a/b_w=1.0$ と 6.5 に対する b_w/t_w はそれぞれ 96.4 と 74.1 になることに注意されたい. 表 6.2 から次のことが分かる.

- (1) $a/b_w=1.0$ の場合, A_w/A_f の変化に対して, V_u/V_Y はほとんど変化せず, 4 辺固定支持された長方形板の V_u/V_Y に近い. さらに, A_w/A_f の変化に対して, V_{cr}/V_u もほとんど変化せず, 4 辺固定支持された長方形板の V_{cr}/V_u に近い.
- (2) $a/b_w=6.5$ の場合, A_w/A_f が大きくなるに従って, V_u/V_Y は, 4 辺固定支持された長方形板の V_u/V_Y から 4 辺単純支持された長方形板の V_u/V_Y に近づく. さらに, A_w/A_f が大きくなるに従って, V_{cr}/V_u も, 4 辺固定支持された長方形板の V_{cr}/V_u から 4 辺単純支持された長方形板の V_{cr}/V_u に近づく.
- (3) a/b_w が 1.0 と 6.5 によらず, 4 辺単純支持された長方形板の V_{cr}/V_u は約 0.7 , 4 辺固定支持された長方形板の V_{cr}/V_u は約 0.9 である. これは, ウェブに対するフランジおよび端補剛材による回転拘束が大きくなるに従って, 桁のせん断耐荷力に対して, ウェブのせん断座屈強度によって負担されるせん断力の占める割合が大きくなることを示している.

上記(1)と(3)は, ウェブのせん断座屈強度が, 対辺固定・対辺単純支持された長方形板のせん断座屈強度に近いこと, ならびに桁のせん断耐荷力に対して, ウェブのせん断座屈強度によって負担されるせん断力の占める割合が大きいことを示した文献(15)に沿った結果である. しかし, 上記(2)が示すように, ウェブの縦横比が 1 から大きくなるに従って, ウェブのせん断座屈強度は, ウェブとフランジの断面積比が大きくなるに従って, 4 辺固定支持された長方形板のせん断座屈強度から 4 辺単純支持された長方形板のせん断座屈強度に近づく. そして, 桁のせん断耐荷力に対して, ウェブのせん断座屈強度によって負担されるせん断力の占める割合が低下する.

表 6.2 V_{cr}/V_u の値および $(V_u - V_{cr})/V_u$ の値

(a) $a/b_w=1.0$

			$\frac{V_u}{V_Y}$	$\frac{V_{cr}}{V_Y}$	$\frac{V_{cr}}{V_u}$	$\frac{V_u - V_{cr}}{V_u}$
桁	A_w/A_f	1.0	0.77	0.66	0.86	0.14
		2.0	0.76	0.65	0.86	0.14
		3.0	0.76	0.65	0.86	0.14
		4.0	0.75	0.64	0.85	0.15
長方形板	4 辺単純支持		0.65	0.44	0.68	0.32
	4 辺固定支持		0.78	0.71	0.91	0.09

(b) $a/b_w=6.5$

			$\frac{V_u}{V_Y}$	$\frac{V_{cr}}{V_Y}$	$\frac{V_{cr}}{V_u}$	$\frac{V_u - V_{cr}}{V_u}$
桁	A_w/A_f	1.0	0.78	0.69	0.88	0.12
		2.0	0.73	0.63	0.86	0.14
		3.0	0.69	0.56	0.81	0.19
		4.0	0.67	0.53	0.79	0.21
長方形板	4 辺単純支持		0.62	0.44	0.71	0.29
	4 辺固定支持		0.78	0.75	0.96	0.04

第7章 結論

本研究では、せん断を受けるアルミニウム合金桁の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) 下フランジを水平方向に拘束し，上フランジを水平方向に強制変位させることにより桁にせん断力を導入する水平方向載荷によって得られる桁のせん断耐荷力は，通常の鉛直方向載荷によって得られる桁のせん断耐荷力を適切に表わす。
- (2) せん断を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力式を仮定し，この式が与える桁のせん断耐荷力と弾塑性有限変位解析によって得られる桁のせん断耐荷力を比較することにより，せん断を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力が次式により安全側に評価されることを示した。

$$\frac{V_u}{V_Y} = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ \frac{Q_1}{R} - \frac{Q_2}{R^2} & (R_1 \leq R \leq R_2) \\ a_1 \left(\frac{R_2}{R} \right)^{a_2} & (R_2 \leq R \leq 3) \end{cases}$$

$$V_Y = \tau_{0.2} b_w t_w$$

$$\tau_{0.2} = \frac{\sigma_{0.2}}{\sqrt{3}}$$

$$Q_1 = \frac{R_1^2 - 0.8R_2^2}{R_1 - R_2}$$

$$Q_2 = Q_1 R_1 - R_1^2$$

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\tau_{0.2}}{E}} \frac{b_w}{t_w}$$

$$k = 5.34 + \frac{4}{(a/b_w)^2} \quad (1 \leq a/b_w)$$

ここに

V_u	: 桁のせん断耐荷力
$\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力 (下表参照)
R_1, R_2, a_1, a_2	: 定数 (下表参照)
μ	: ポアソン比 (=0.3)

E	: ヤング率 (=70GPa)
a	: ウェブの長さ
b_w	: ウェブの高さ
t_w	: ウェブの板厚

表 7.1 $\sigma_{0.2}$, R_1 , R_2 , a_1 , a_2 の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	R_1	R_2	a_1	a_2
A6061-T6	245	0.60	1.09	0.80	0.81
A5083-O	125	0.53	0.92	0.80	0.76

- (3) ウェブの縦横比が 1.0 の桁においては、ウェブとフランジの断面積比の増加によるせん断耐荷力の低下はわずかである。しかし、ウェブの縦横比が大きくなるに従って、ウェブとフランジの断面積比の増加によるせん断耐荷力の低下の割合は大きくなり、(2) の耐荷力式が与える値に近づく。
- (4) ウェブの縦横比が 1 の桁の場合、ウェブとフランジの断面積比に依らず、ウェブのせん断座屈強度は 4 辺固定支持された長方形板のせん断座屈強度に近い。そして、桁のせん断耐荷力に対して、ウェブのせん断座屈強度によって負担されるせん断力の占める割合が大きい。しかし、ウェブの縦横比が 1 から大きくなるに従って、ウェブのせん断座屈強度は、ウェブとフランジの断面積比が大きくなるに従って、4 辺固定支持された長方形板のせん断座屈強度から 4 辺単純支持された長方形板のせん断座屈強度に近づく。そして、桁のせん断耐荷力に対して、ウェブのせん断座屈強度によって負担されるせん断力の占める割合が低下する。

参考文献

- 1) 土木学会, 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, 第 50 巻, 第 3 号, pp.26-30, 2016.
- 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) 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) 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 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.3, pp.491-504, 2013.
- 8) 前田貴公, 大倉一郎: 縦補剛されたアルミニウム合金板のせん断耐荷力, ALST 研究レポート, No.44, 2016.
- 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) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, pp.305-306, 2012.
- 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 2013.0.0.
- 13) 土木学会, 鋼造工学委員会, 座屈設計ガイドライン改訂小委員会: 座屈設計ガイドライン 改訂第 2 版 [2005 年改訂版], pp.193-198, 2005.
- 14) 吉識雅夫, 藤田譲, 川村昭宣, 荒井宏範: 有孔板の座屈強度について (その 1), 造船協会論文集, 第 122 号, pp.137-145, 1967.
- 15) Lee, S. C. and Yoo, C. H.: Strength of plate girder web panels under pure shear, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp.184-194, 1998.

付録 A せん断を受ける A5083-O の長方形板の耐荷力

せん断を受ける A5083-O の長方形板の解析条件は文献 7) と同じである。縦横比 $a/b=6.5$ の長方形板に対して、式(3.1)が与える耐荷力曲線と解析値の比較を図 A.1 に示す。解析値は耐荷力曲線の直上にある。せん断耐荷力と縦横比の関係を図 A.2 に示す。各縦横比に対して、せん断耐荷力はほとんど変化しない。したがって、せん断を受ける A5083-O の長方形板に対して、式(3.1)が与えるせん断耐荷力は $R \leq 3.0$ の範囲で適用可能である。

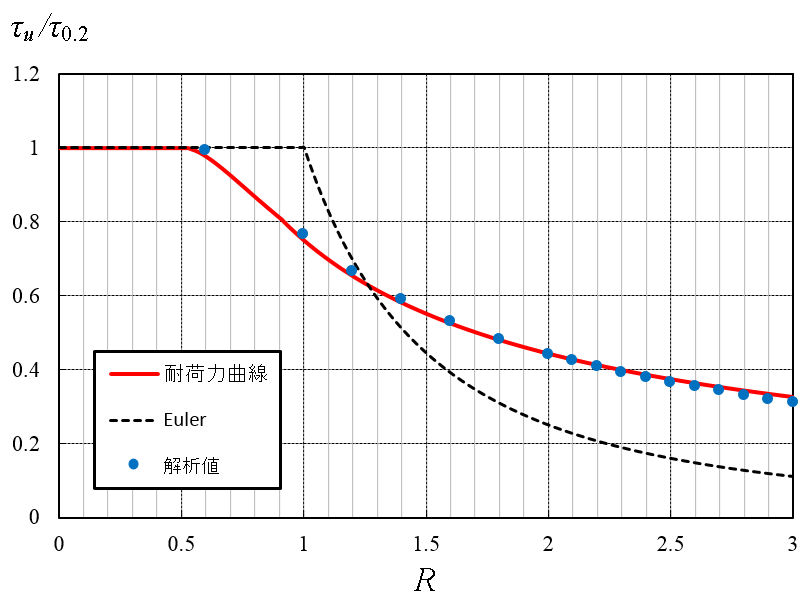


図 A.1 $\tau/\tau_{0.2}$ と R の関係

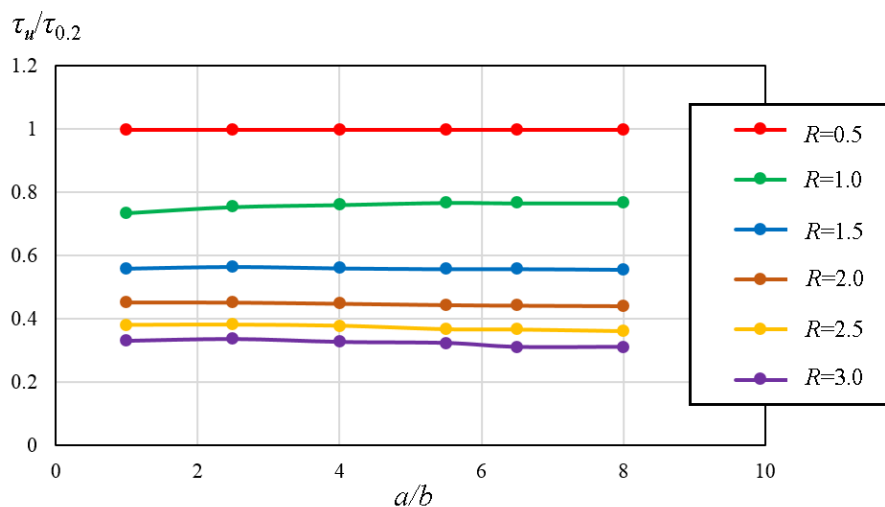


図 A.2 $\tau/\tau_{0.2}$ と a/b の関係

付録 B 桁および端補剛材の断面寸法

表 B.1 A6061-T6 で $a/b_w=1.0$

(a) $A_w/A_f=1.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	19.4	41.3	800.0	50.8	304.5	38.2	229.0
0.6	38.8	20.6	800.0	36.2	217.4	27.4	164.1
1.0	64.6	12.4	800.0	28.2	169.3	19.6	117.6
1.5	97.0	8.3	800.0	23.1	138.7	13.9	83.1
2.0	129.3	6.2	800.0	20.1	120.3	10.8	64.8
2.5	161.6	5.0	800.0	18.0	107.8	8.9	53.7
3.0	193.9	4.1	800.0	16.4	98.5	7.7	46.2

(b) $A_w/A_f=2.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	19.4	41.3	800.0	35.4	212.4	38.2	229.0
0.6	38.8	20.6	800.0	25.4	152.3	27.4	164.1
1.0	64.6	12.4	800.0	19.8	118.8	19.6	117.6
1.5	97.0	8.3	800.0	16.2	97.5	13.9	83.1
2.0	129.3	6.2	800.0	14.1	84.6	10.8	64.8
2.5	161.6	5.0	800.0	12.6	75.9	8.9	53.7
3.0	193.9	4.1	800.0	11.6	69.3	7.7	46.2

(c) $A_w/A_f=3.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	19.4	41.3	800.0	28.6	171.7	38.2	229.0
0.6	38.8	20.6	800.0	20.6	123.4	27.4	164.1
1.0	64.6	12.4	800.0	16.1	96.5	19.6	117.6
1.5	97.0	8.3	800.0	13.2	79.2	13.9	83.1
2.0	129.3	6.2	800.0	11.5	68.8	10.8	64.8
2.5	161.6	5.0	800.0	10.3	61.7	8.9	53.7
3.0	193.9	4.1	800.0	9.4	56.4	7.7	46.2

(d) $A_w/A_f=4.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	19.4	41.3	800.0	24.6	147.4	38.2	229.0
0.6	38.8	20.6	800.0	17.7	106.2	27.4	164.1
1.0	64.6	12.4	800.0	13.9	83.1	19.6	117.6
1.5	97.0	8.3	800.0	11.4	68.3	13.9	83.1
2.0	129.3	6.2	800.0	9.9	59.4	10.8	64.8
2.5	161.6	5.0	800.0	8.9	53.3	8.9	53.7
3.0	193.9	4.1	800.0	8.1	48.7	7.7	46.2

表 B.2 A6061-T6 で $a/b_w=3.0$ (a) $A_w/A_f=1.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	15.3	52.4	800.0	57.0	341.9	42.8	256.7
0.6	30.5	26.2	800.0	40.7	244.4	30.7	184.1
1.0	50.9	15.7	800.0	31.7	190.4	22.0	131.9
1.5	76.3	10.5	800.0	26.0	156.0	15.5	93.1
2.0	101.7	7.9	800.0	22.6	135.4	12.1	72.4
2.5	127.2	6.3	800.0	20.2	121.3	10.0	59.8
3.0	152.6	5.2	800.0	18.5	110.9	8.6	51.3

(b) $A_w/A_f=2.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	15.3	52.4	800.0	39.7	238.1	42.8	256.7
0.6	30.5	26.2	800.0	28.5	170.9	30.7	184.1
1.0	50.9	15.7	800.0	22.3	133.5	22.0	131.9
1.5	76.3	10.5	800.0	18.3	109.6	15.5	93.1
2.0	101.7	7.9	800.0	15.9	95.2	12.1	72.4
2.5	127.2	6.3	800.0	14.2	85.3	10.0	59.8
3.0	152.6	5.2	800.0	13.0	78.0	8.6	51.3

(c) $A_w/A_f=3.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	15.3	52.4	800.0	32.0	192.1	42.8	256.7
0.6	30.5	26.2	800.0	23.1	138.4	30.7	184.1
1.0	50.9	15.7	800.0	18.1	108.3	22.0	131.9
1.5	76.3	10.5	800.0	14.8	89.0	15.5	93.1
2.0	101.7	7.9	800.0	12.9	77.4	12.1	72.4
2.5	127.2	6.3	800.0	11.6	69.4	10.0	59.8
3.0	152.6	5.2	800.0	10.6	63.5	8.6	51.3

(d) $A_w/A_f=4.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	15.3	52.4	800.0	27.5	164.7	42.8	256.7
0.6	30.5	26.2	800.0	19.8	119.0	30.7	184.1
1.0	50.9	15.7	800.0	15.5	93.3	22.0	131.9
1.5	76.3	10.5	800.0	12.8	76.7	15.5	93.1
2.0	101.7	7.9	800.0	11.1	66.8	12.1	72.4
2.5	127.2	6.3	800.0	10.0	59.9	10.0	59.8
3.0	152.6	5.2	800.0	9.1	54.8	8.6	51.3

表 B.3 A6061-T6 で $a/b_w=6.5$

(a) $A_w/A_f=1.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	14.8	54.1	800.0	57.8	347.0	43.4	260.6
0.6	29.6	27.0	800.0	41.3	248.1	31.1	186.8
1.0	49.3	16.2	800.0	32.2	193.3	22.3	133.8
1.5	74.0	10.8	800.0	26.4	158.4	15.7	94.5
2.0	98.6	8.1	800.0	22.9	137.5	12.2	73.5
2.5	123.3	6.5	800.0	20.5	123.2	10.1	60.7
3.0	147.9	5.4	800.0	18.8	112.6	8.7	52.1

(b) $A_w/A_f=2.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	14.8	54.1	800.0	40.3	241.6	43.4	260.6
0.6	29.6	27.0	800.0	28.9	173.5	31.1	186.8
1.0	49.3	16.2	800.0	22.6	135.5	22.3	133.8
1.5	74.0	10.8	800.0	18.5	111.3	15.7	94.5
2.0	98.6	8.1	800.0	16.1	96.7	12.2	73.5
2.5	123.3	6.5	800.0	14.4	86.6	10.1	60.7
3.0	147.9	5.4	800.0	13.2	79.2	8.7	52.1

(c) $A_w/A_f=3.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	14.8	54.1	800.0	32.5	194.9	43.4	260.6
0.6	29.6	27.0	800.0	23.4	140.5	31.1	186.8
1.0	49.3	16.2	800.0	18.3	109.9	22.3	133.8
1.5	74.0	10.8	800.0	15.1	90.4	15.7	94.5
2.0	98.6	8.1	800.0	13.1	78.6	12.2	73.5
2.5	123.3	6.5	800.0	11.7	70.5	10.1	60.7
3.0	147.9	5.4	800.0	10.7	64.4	8.7	52.1

(d) $A_w/A_f=4.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	14.8	54.1	800.0	27.9	167.1	43.4	260.6
0.6	29.6	27.0	800.0	20.1	120.8	31.1	186.8
1.0	49.3	16.2	800.0	15.8	94.7	22.3	133.8
1.5	74.0	10.8	800.0	13.0	77.9	15.7	94.5
2.0	98.6	8.1	800.0	11.3	67.8	12.2	73.5
2.5	123.3	6.5	800.0	10.1	60.8	10.1	60.7
3.0	147.9	5.4	800.0	9.3	55.6	8.7	52.1

表 B.4 A5083-O で $a/b_w=1.0$ (a) $A_w/A_f=1.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	27.1	29.5	800.0	47.1	235.5	35.5	177.3
0.6	54.3	14.7	800.0	33.6	168.0	25.2	125.8
1.0	90.5	8.8	800.0	26.2	130.8	17.3	86.3
1.5	135.7	5.9	800.0	21.4	107.1	12.3	61.4
2.0	181.0	4.4	800.0	18.6	92.9	9.7	48.6
2.5	226.2	3.5	800.0	16.6	83.2	8.1	40.7
3.0	271.5	2.9	800.0	15.2	76.0	7.1	35.5

(b) $A_w/A_f=2.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	27.1	29.5	800.0	32.9	164.5	35.5	177.3
0.6	54.3	14.7	800.0	23.6	117.8	25.2	125.8
1.0	90.5	8.8	800.0	18.4	91.8	17.3	86.3
1.5	135.7	5.9	800.0	15.1	75.3	12.3	61.4
2.0	181.0	4.4	800.0	13.1	65.4	9.7	48.6
2.5	226.2	3.5	800.0	11.7	58.6	8.1	40.7
3.0	271.5	2.9	800.0	10.7	53.6	7.1	35.5

(c) $A_w/A_f=3.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	27.1	29.5	800.0	26.6	133.0	35.5	177.3
0.6	54.3	14.7	800.0	19.1	95.5	25.2	125.8
1.0	90.5	8.8	800.0	14.9	74.6	17.3	86.3
1.5	135.7	5.9	800.0	12.2	61.2	12.3	61.4
2.0	181.0	4.4	800.0	10.6	53.2	9.7	48.6
2.5	226.2	3.5	800.0	9.5	47.7	8.1	40.7
3.0	271.5	2.9	800.0	8.7	43.6	7.1	35.5

(d) $A_w/A_f=4.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	27.1	29.5	800.0	22.8	114.2	35.5	177.3
0.6	54.3	14.7	800.0	16.4	82.2	25.2	125.8
1.0	90.5	8.8	800.0	12.9	64.3	17.3	86.3
1.5	135.7	5.9	800.0	10.6	52.8	12.3	61.4
2.0	181.0	4.4	800.0	9.2	45.9	9.7	48.6
2.5	226.2	3.5	800.0	8.2	41.2	8.1	40.7
3.0	271.5	2.9	800.0	7.5	37.7	7.1	35.5

表 B. 5 A5083-O で $a/b_w=3.0$ (a) $A_w/A_f=1.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	21.4	37.4	800.0	52.9	264.5	39.7	198.7
0.6	42.7	18.7	800.0	37.8	188.9	28.2	141.0
1.0	71.2	11.2	800.0	29.4	147.1	19.3	96.7
1.5	106.8	7.5	800.0	24.1	120.5	13.7	68.6
2.0	142.4	5.6	800.0	20.9	104.6	10.8	54.1
2.5	178.0	4.5	800.0	18.7	93.7	9.0	45.2
3.0	213.6	3.7	800.0	17.1	85.6	7.8	39.2

(b) $A_w/A_f=2.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	21.4	37.4	800.0	36.9	184.4	39.7	198.7
0.6	42.7	18.7	800.0	26.4	132.2	28.2	141.0
1.0	71.2	11.2	800.0	20.6	103.2	19.3	96.7
1.5	106.8	7.5	800.0	16.9	84.7	13.7	68.6
2.0	142.4	5.6	800.0	14.7	73.6	10.8	54.1
2.5	178.0	4.5	800.0	13.2	65.9	9.0	45.2
3.0	213.6	3.7	800.0	12.1	60.3	7.8	39.2

(c) $A_w/A_f=3.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	21.4	37.4	800.0	29.8	148.9	39.7	198.7
0.6	42.7	18.7	800.0	21.4	107.1	28.2	141.0
1.0	71.2	11.2	800.0	16.8	83.8	19.3	96.7
1.5	106.8	7.5	800.0	13.8	68.8	13.7	68.6
2.0	142.4	5.6	800.0	12.0	59.8	10.8	54.1
2.5	178.0	4.5	800.0	10.7	53.6	9.0	45.2
3.0	213.6	3.7	800.0	9.8	49.0	7.8	39.2

(d) $A_w/A_f=4.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	21.4	37.4	800.0	25.6	127.8	39.7	198.7
0.6	42.7	18.7	800.0	18.4	92.2	28.2	141.0
1.0	71.2	11.2	800.0	14.4	72.2	19.3	96.7
1.5	106.8	7.5	800.0	11.9	59.4	13.7	68.6
2.0	142.4	5.6	800.0	10.3	51.6	10.8	54.1
2.5	178.0	4.5	800.0	9.3	46.3	9.0	45.2
3.0	213.6	3.7	800.0	8.5	42.3	7.8	39.2

表 B. 6 A5083-O で $a/b_w=6.5$

(a) $A_w/A_f=1.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	20.7	38.6	800.0	53.7	268.5	40.3	201.7
0.6	41.4	19.3	800.0	38.4	191.8	28.6	143.2
1.0	69.0	11.6	800.0	29.9	149.4	19.6	98.1
1.5	103.5	7.7	800.0	24.5	122.4	13.9	69.6
2.0	138.1	5.8	800.0	21.2	106.2	11.0	54.8
2.5	172.6	4.6	800.0	19.0	95.1	9.2	45.8
3.0	207.1	3.9	800.0	17.4	86.9	7.9	39.7

(b) $A_w/A_f=2.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	20.7	38.6	800.0	37.4	187.1	40.3	201.7
0.6	41.4	19.3	800.0	26.8	134.2	28.6	143.2
1.0	69.0	11.6	800.0	21.0	104.8	19.6	98.1
1.5	103.5	7.7	800.0	17.2	86.0	13.9	69.6
2.0	138.1	5.8	800.0	14.9	74.7	11.0	54.8
2.5	172.6	4.6	800.0	13.4	66.9	9.2	45.8
3.0	207.1	3.9	800.0	12.2	61.2	7.9	39.7

(c) $A_w/A_f=3.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	20.7	38.6	800.0	30.2	151.1	40.3	201.7
0.6	41.4	19.3	800.0	21.8	108.8	28.6	143.2
1.0	69.0	11.6	800.0	17.0	85.1	19.6	98.1
1.5	103.5	7.7	800.0	14.0	69.9	13.9	69.6
2.0	138.1	5.8	800.0	12.1	60.7	11.0	54.8
2.5	172.6	4.6	800.0	10.9	54.4	9.2	45.8
3.0	207.1	3.9	800.0	10.0	49.8	7.9	39.7

(d) $A_w/A_f=4.0$

R	b_w/t_w	t_w (mm)	b_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	t_s (mm)	b_s (mm)
0.3	20.7	38.6	800.0	25.9	129.7	40.3	201.7
0.6	41.4	19.3	800.0	18.7	93.6	28.6	143.2
1.0	69.0	11.6	800.0	14.7	73.3	19.6	98.1
1.5	103.5	7.7	800.0	12.1	60.3	13.9	69.6
2.0	138.1	5.8	800.0	10.5	52.4	11.0	54.8
2.5	172.6	4.6	800.0	9.4	47.0	9.2	45.8
3.0	207.1	3.9	800.0	8.6	43.0	7.9	39.7

付録 C FEM 解析の数値データ [図 5.5]

表 C.1 A6061-T6

R	V_u/V_Y	
	鉛直方向載荷	水平方向載荷
0.6	1.08	1.10
1.0	0.97	0.99
1.5	0.75	0.77
2.0	0.61	0.63
2.5	0.52	0.54
3.0	0.46	0.46

表 C.2 A5083-O

R	V_u/V_Y	
	鉛直方向載荷	水平方向載荷
0.6	1.07	1.10
1.0	0.91	0.94
1.5	0.68	0.70
2.0	0.56	0.57
2.5	0.48	0.49
3.0	0.42	0.43

付録D FEM 解析の数値データ [図 6.1 と 6.2]

表 D.1 A6061-T6

(a) $a/b_w=1.0$

R	V_u/V_Y			
	$A_w/A_f=1.0$	$A_w/A_f=2.0$	$A_w/A_f=3.0$	$A_w/A_f=4.0$
0.3	1.21	1.10	1.06	1.05
0.6	1.10	1.04	1.03	1.02
1.0	0.99	0.97	0.96	0.95
1.5	0.77	0.75	0.75	0.75
2.0	0.63	0.62	0.61	0.60
2.5	0.54	0.52	0.52	0.51
3.0	0.46	0.45	0.44	0.44

(b) $a/b_w=3.0$

R	V_u/V_Y			
	$A_w/A_f=1.0$	$A_w/A_f=2.0$	$A_w/A_f=3.0$	$A_w/A_f=4.0$
0.3	1.12	1.07	1.05	1.04
0.6	1.05	1.03	1.03	1.02
1.0	1.00	0.96	0.93	0.91
1.5	0.77	0.74	0.72	0.70
2.0	0.61	0.59	0.58	0.57
2.5	0.50	0.49	0.49	0.48
3.0	0.44	0.43	0.42	0.41

(c) $a/b_w=6.5$

R	V_u/V_Y			
	$A_w/A_f=1.0$	$A_w/A_f=2.0$	$A_w/A_f=3.0$	$A_w/A_f=4.0$
0.3	1.09	1.05	1.04	1.04
0.6	1.05	1.03	1.03	1.02
1.0	1.00	0.96	0.92	0.90
1.5	0.77	0.73	0.69	0.68
2.0	0.60	0.57	0.54	0.52
2.5	0.50	0.47	0.44	0.43
3.0	0.43	0.39	0.37	0.36

表 D.2 A5083-O

(a) $a/b_w=1.0$

R	V_u/V_Y			
	$A_w/A_f=1.0$	$A_w/A_f=2.0$	$A_w/A_f=3.0$	$A_w/A_f=4.0$
0.3	1.18	1.08	1.05	1.04
0.6	1.07	1.03	1.02	1.02
1.0	0.93	0.91	0.91	0.89
1.5	0.70	0.68	0.68	0.67
2.0	0.57	0.55	0.55	0.54
2.5	0.48	0.47	0.46	0.46
3.0	0.42	0.41	0.40	0.40

(b) $a/b_w=3.0$

R	V_u/V_Y			
	$A_w/A_f=1.0$	$A_w/A_f=2.0$	$A_w/A_f=3.0$	$A_w/A_f=4.0$
0.3	1.10	1.06	1.04	1.03
0.6	1.05	1.03	1.03	1.02
1.0	0.96	0.92	0.89	0.86
1.5	0.69	0.67	0.66	0.64
2.0	0.55	0.54	0.53	0.52
2.5	0.47	0.45	0.44	0.44
3.0	0.40	0.39	0.38	0.38

(c) $a/b_w=6.5$

R	V_u/V_Y			
	$A_w/A_f=1.0$	$A_w/A_f=2.0$	$A_w/A_f=3.0$	$A_w/A_f=4.0$
0.3	1.08	1.05	1.04	1.03
0.6	1.05	1.03	1.03	1.02
1.0	0.96	0.93	0.88	0.85
1.5	0.69	0.67	0.64	0.62
2.0	0.55	0.53	0.50	0.48
2.5	0.45	0.44	0.41	0.40
3.0	0.39	0.38	0.36	0.34

付録 E Δ^2 法によるせん断座屈応力の推定

Δ^2 法は、せん断応力 τ とウェブの最大たわみ w の二乗の関係が直線性を示すことを用いてせん断座屈応力を推定する方法である¹⁴⁾。せん断座屈応力は次式の切片で与えられる。

$$\tau = \tau_{cr} + cw^2 \quad (\text{E.1})$$

ここに、 τ_{cr} : 直線の切片 (せん断座屈応力)

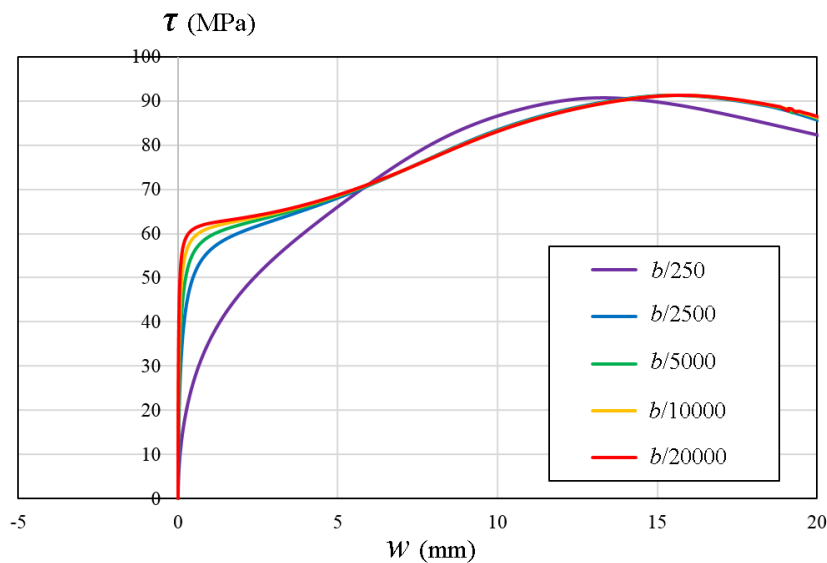
c : 直線の傾き

表 E.1 に示す寸法のアルミニウム合金 A6061-T6 の 4 辺単純支持された長方形板に対して Δ^2 法を適用する。面内方向の境界条件は表 6.1 と同じである。式(5.2)に示す初期たわみを長方形板に仮定し、最大初期たわみ $w_{0\max}$ に対して $b/250$, $b/2500$, $b/5000$, $b/10000$, $b/20000$ を考慮する。 $\tau-w$ 関係を図 E.1 に示す。さらに、 $\tau-w^2$ 関係を図 E.2 に示す。 w は長方形板の中心の面外変位である。

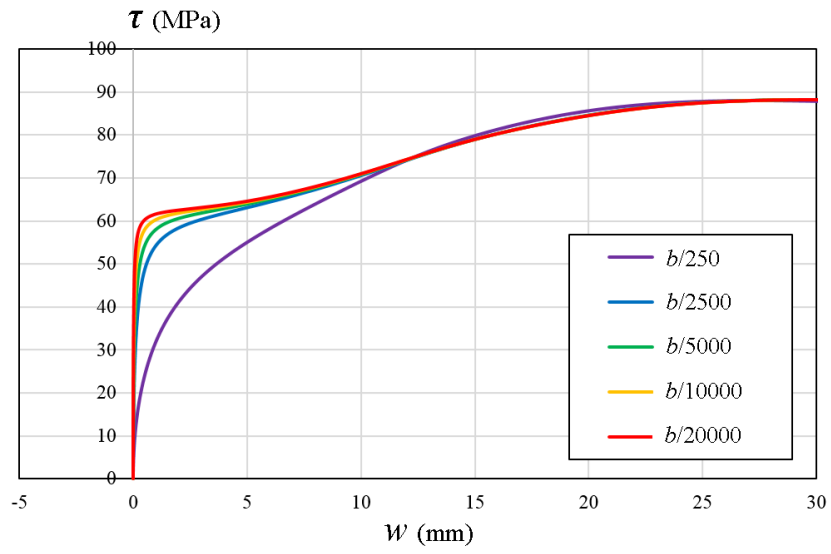
表 E.1 長方形板の寸法

a/b	R	μ	E (GPa)	$\tau_{0.2}$ (MPa)	b (mm)	t (mm)
1.0	1.5	0.3	70	141.5	800	8.3
6.5						10.8

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\tau_{0.2}}{E}} \frac{b}{t} \quad k = 5.34 + \frac{4}{(a/b)^2} \quad (1 \leq a/b)$$

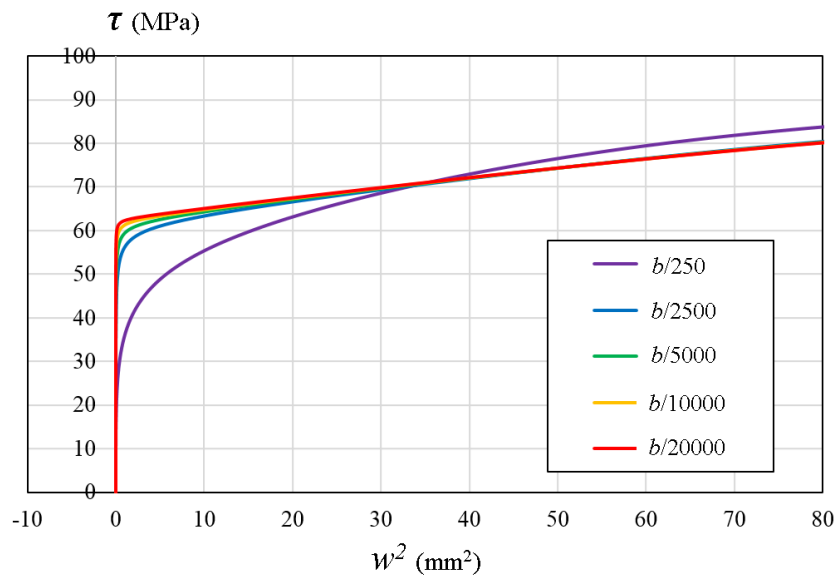


(a) $a/b=1.0$

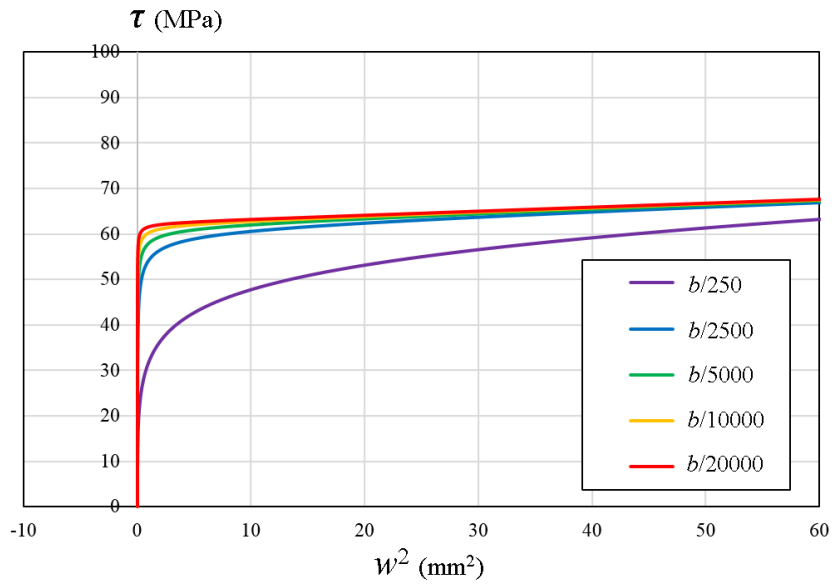


(b) $a/b=6.5$

図 E.1 $\tau-w$ 関係



(a) $a/b=1.0$



(b) $a/b=6.5$

図 E.2 $\tau-w^2$ 関係

図 E.2 の $\tau-w^2$ 関係に式(E.1)を仮定して得られるせん断座屈応力 τ_{cr} を表 E.2 に示す. 同表には, 式(3.6)のせん断座屈係数を用いて得られるせん断座屈応力の理論値も示してある. 最大初期たわみが小さくなるに従って, Δ^2 法によるせん断座屈応力の推定値は理論値に近づく. 最大初期たわみに対して $b/20000$ を採用すれば, Δ^2 法によって推定されるせん断座屈応力は理論値にほぼ等しくなる.

表 E.2 Δ^2 法によって推定されたせん断座屈応力

a/b	τ_{cr} (MPa)					理論値
	$b/250$	$b/2500$	$b/5000$	$b/10000$	$b/20000$	
1.0	55.1	61.8	62.6	63.1	63.3	63.6
6.5	47.9	60.1	61.3	62.0	62.3	62.7