

# 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 49

2017年3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、せん断を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力を明らかにし、その推定式を与える。A6061-T6 の桁に対して無補剛桁、A5083-O の桁に対して無補剛桁および中間垂直補剛材を有する桁を研究対象としている。

## 注記

本研究レポートは、ALST 研究レポート、No.47 を再編するとともに、中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁のせん断耐荷力について扱っている。

## 目次

第1章 序論	・・・1
第2章 桁および端補剛材の断面寸法	・・・3
2.1 桁の断面寸法	・・・3
2.2 端補剛材の断面寸法	・・・4
第3章 FEMによる弾塑性有限変位解析	・・・8
3.1 解析対象	・・・8
3.2 応力-ひずみ関係	・・・9
3.3 境界条件	・・・9
3.4 初期たわみ	・・・10
3.5 要素分割	・・・11
3.6 載荷方法	・・・14
第4章 無補剛桁のせん断耐荷力	・・・20
4.1 無補剛桁のせん断耐荷力に影響を与える因子	・・・20
4.2 無補剛桁のせん断耐荷力の推定式	・・・26
第5章 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁のせん断耐荷力	・・・38
5.1 道路橋示方書で規定される中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁のせん断耐荷力	・・・38
5.2 中間垂直補剛桁のせん断耐荷力の推定式	・・・45
第6章 結論	・・・47
参考文献	・・・50
付録 A 無補剛桁および端補剛材の断面寸法 [A6061-T6]	・・・51
付録 B 無補剛桁および端補剛材の断面寸法 [A5083-O]	・・・56
付録 C 中間垂直補剛材を有する桁および端補剛材の断面寸法	・・・61
付録 D FEM 解析の数値データ [図 3.6]	・・・63
付録 E $A^2$ 法によるせん断座屈応力の推定	・・・64
付録 F せん断を受ける A5083-O の長方形板の耐荷力	・・・67

付録 G	縦横比が 1 未満の長方形板のせん断耐荷力 [A5083-O]	・・・ 68
付録 H	FEM 解析の数値データ [図 4.5 と 4.6]	・・・ 69
付録 I	FEM 解析の数値データ [図 5.4]	・・・ 72

## 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た<sup>1)</sup>。さらに、2011年に道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋が建設され<sup>2)</sup>、2015年には津波対策用の緊急仮設橋の床版にアルミニウム床版が採用された<sup>3)</sup>。このような状況で、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材が適用され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に示すように、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、ウェブの水平方向に、等間隔に縦補剛材が配置されたアルミニウム合金桁が提案された<sup>4)</sup>。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。

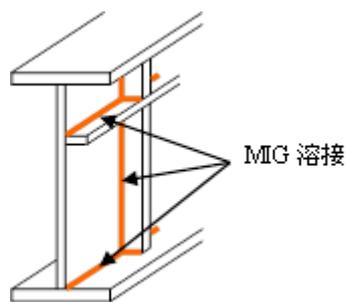


図1.1 従来のアルミニウム合金桁

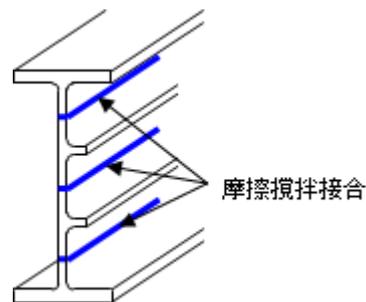


図1.2 縦補剛されたアルミニウム合金桁

摩擦攪拌接合はMIG溶接に比べて入熱量が少ないので、摩擦攪拌接合部が強度低下する割合とその範囲はMIG溶接のそれらより小さいが、摩擦攪拌接合においても接合部は強度低下を起こす。これに対して、図1.3に示すように、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することができる<sup>5)</sup>。

$$t_j = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{j0.2}} t \quad (1.1)$$

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

式(1.1)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ことが示されている<sup>6)</sup>。

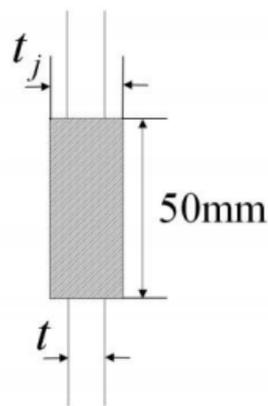


図 1.3 部分的に増厚された板

他方、図 1.1 に示す、従来のアルミニウム合金桁に使用される A5083-O の溶接部に強度低下は生じない<sup>5)</sup>。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しないことが明らかにされている<sup>6)</sup>。

アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）<sup>5)</sup>が 2015 年に制定された。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。前述のアルミニウム合金桁を設計できるようにするためには、これらの許容応力度が規定される必要がある。そこで、曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力について研究が行われた<sup>7),8)</sup>。

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。本研究では、図 1.2 に示す、A6061-T6 の桁に対して無補剛桁、図 1.1 に示す A5083-O の桁に対して無補剛桁および中間垂直補剛材を有する桁を研究対象とする。

## 第 2 章 桁および端補剛材の断面寸法

### 2.1 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、自由突出板がアルミニウム合金の 0.2% 耐力を維持する限界の幅厚比が次式で与えられる。

$$\beta_{f1} = \pi \sqrt{\frac{0.425}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} R_{f1} \quad (2.1)$$

ここに、 $\beta_{f1}$  : 自由突出板が 0.2% 耐力  $\sigma_{0.2}$  を維持する限界の幅厚比の値  
 $R_{f1}$  : 自由突出板が 0.2% 耐力  $\sigma_{0.2}$  を維持する限界の幅厚比パラメータの値  
 $E$  : ヤング率 (=70GPa)  
 $\mu$  : ポアソン比 (=0.3)  
 $\sigma_{0.2}$  : 0.2% 耐力

A6061-T6 と A5083-O に対する  $R_{f1}$  と  $\beta_{f1}$  の値を表 2.1 に示す。 $R_{f1}$  の値は文献 9) で与えられる値である。 $\beta_{f1}$  よりさらに小さな値  $\beta_f$  を片側のフランジの幅厚比に与える。

表 2.1  $\sigma_{0.2}$ ,  $R_{f1}$ ,  $\beta_{f1}$ ,  $\beta_f$  の値

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

図 2.1 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。

$$b_f = \beta_f t_f \quad (2.2)$$

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。

$$A_w = t_f(2b_f + t_w) \quad (2.3)$$

ここに、 $t_w$  : ウェブの板厚

式(2.2)を式(2.3)に代入して次式を得る。

$$2\beta_f t_f^2 + t_w t_f - A_f = 0 \quad (2.4)$$

アルミニウム合金 A6061-T6 と A5083-O の無補剛桁に対して、ウェブ高  $b_w$  を 800mm とし、第 4 章で与えられる式(4.5)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。ここで、式(4.5)の中の  $F_L$  を 1 とする。他方、中間垂直補剛材を有する A5083-O の桁に対しては、ウェブ高  $b_w$  を 800mm とし、第 5 章で与えられる式(5.1)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。ここで、式(5.1)の中の  $F$  を 1 とする。次に、 $A_w$  に対して設定されたフランジの断面積  $A_f$  と  $t_w$  を式(2.4)に代入して  $t_f$  を求める。 $t_f$  を式(2.2)に代入して  $b_f$  を計算する。

第 4 章で述べる、FEM による弾塑性有限変位解析で考慮される A6061-T6 と A5083-O の無補剛桁の断面寸法をそれぞれ付録 A と B に示す。さらに、第 5 章で述べる、FEM による弾塑性有限変位解析で考慮される、中間垂直補剛材を有する A5083-O の桁の断面寸法を付録 C に示す。

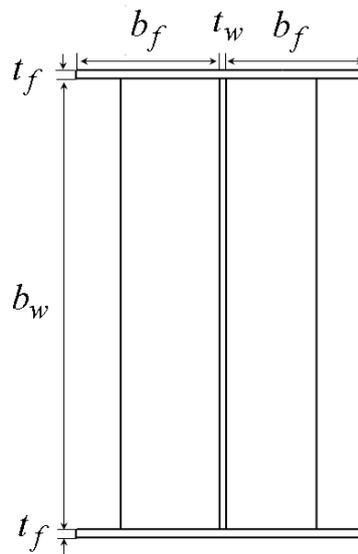


図 2.1 桁の断面

## 2.2 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<sup>10)</sup>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<sup>5)</sup>。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_1) \\ c_0 + c_1\lambda + c_2\lambda^2 + c_3\lambda^3 + c_4\lambda^4 & (\lambda_1 \leq \lambda \leq 2) \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{l}{r} \quad (2.6)$$

ここに、 $\sigma_u$  : 柱部材の圧縮耐荷力  
 $\lambda$  : 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  
 $\lambda_1$  :  $\lambda$  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  $\lambda_1$  と  $c_0 \sim c_4$  の値を表 2.2 に示す.

表 2.2  $\lambda_1$  と  $c_0 \sim c_4$  の値

アルミニウム 合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\lambda_1$	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$
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 2.2 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.

$$r = \sqrt{\frac{I_s}{A_s}} \quad (2.7)$$

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.

$$I_s = \frac{(2b_s + t_w)^3 t_s}{12} \quad (2.8)$$

$$A_s = (2b_s + t_w)t_s \quad (2.9)$$

ここに、 $b_s$  : 片側の端補剛材の板幅

$t_s$  : 端補剛材の板厚

式(2.8)と(2.9)を式(2.7)に代入して次式を得る.

$$r = \frac{2b_s + t_w}{2\sqrt{3}} \quad (2.10)$$

式(2.6)の  $l$  をウェブ高  $b_w$  に置き換えた式に式(2.10)を代入して次式を得る.

$$\lambda = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{b_w}{2b_s + t_w} \quad (2.11)$$

図 2.2 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  $\sigma_s$  は次式で与えられる。

$$\sigma_s = \frac{V_u}{A_s} = \frac{V_u}{(2b_s + t_w)t_s} \quad (2.12)$$

ここに、 $V_u$  : 桁のせん断耐荷力

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。

$$\frac{V_u}{(2b_s + t_w)t_s} \leq \sigma_u \quad (2.13)$$

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  $\beta_s$  に対して、A6061-T6 と A5083-O に対してそれぞれ 6 と 5 を与える。

片側の端補剛材の板幅  $b_s$  が次式で与えられる。

$$b_s = \beta_s t_s \quad (2.14)$$

式(2.14)を式(2.11)と(2.13)にそれぞれ代入して次式を得る。

$$\lambda = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{b_w}{2\beta_s t_s + t_w} \quad (2.15)$$

$$\frac{V_u}{(2\beta_s t_s + t_w)t_s} \leq \sigma_u \quad (2.16)$$

ウェブの断面寸法  $b_w$  と  $t_w$  に対して、第 4 章で与えられる式(4.2)より桁のせん断耐荷力  $V_u$  の値が与えられる。ここで、アルミニウム合金 A6061-T6 と A5083-O の無補剛桁に対して、式(4.2)の  $R$  の中の  $F_L$  を 1 とする。他方、中間垂直補剛材を有する A5083-O の桁に対しては、第 5 章で与えられる式(5.1)の中の  $F$  を 1 とする。式(2.15)から分かるように、 $\lambda$  は  $t_s$  を変数として持つので、 $\sigma_u$  は  $t_s$  の関数になる。したがって、式(2.16)は  $t_s$  に関して非線形になるので、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 4 章で述べる、FEM による弾塑性有限変位解析で考慮される A6061-T6 と A5083-O の無補剛桁の端補剛材の断面寸法をそれぞれ付録 A と B に示す。さらに、第 5 章で述べる、FEM による弾塑性有限変位解析で考慮される、中間垂直補剛材を有する A5083-O の桁の端補剛材の断面寸法を付録 C に示す。

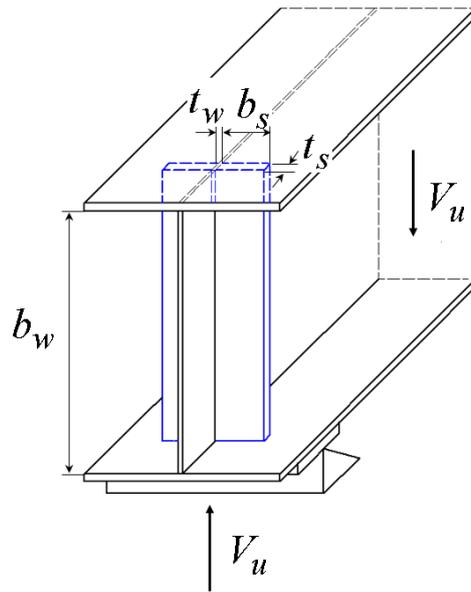


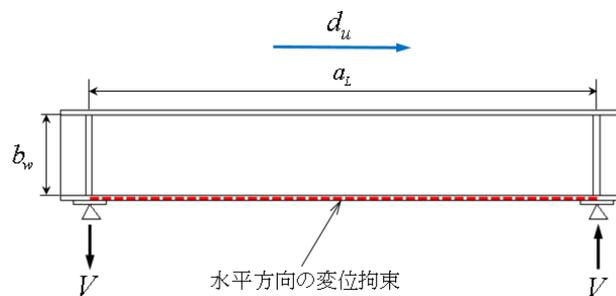
図 2.2 端補剛材の寸法

### 第3章 FEMによる弾塑性有限変位解析

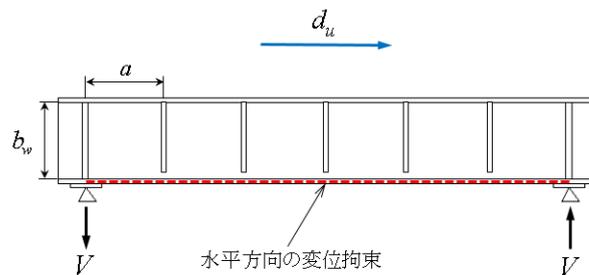
#### 3.1 解析対象

アルミニウム合金 A6061-T6 と A5083-O のアルミニウム合金に対して、図 3.1 (a) に示すように、両支点上の端補剛材と上下フランジとで囲まれたウェブの縦横比  $a_L/b_w$  が 1.0, 3.0, 6.5 の桁を解析対象とする。ここで、 $a_L$  は両支点上の端補剛材の間隔である。これらの桁は、中間垂直補剛材を持たない無補剛桁である。さらに、図 3.1 (b) に示すように、A5083-O に対しては、両支点間の長さがウェブ高の 6 倍の桁で、隣接する中間垂直補剛材と上下フランジとで囲まれたウェブの縦横比  $a/b_w$  が 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 の桁を解析対象とする。ここで、 $a$  は隣接する中間垂直補剛材の間隔である。

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 3.1 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。両支点上の端補剛材と上下フランジとで囲まれたウェブの縦横比  $a_L/b_w$  が 1.0 の無補剛桁に対して、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 3.6 節で述べる。



(a) 無補剛桁



(b) 中間垂直補剛材を有する桁

図 3.1 解析対象

### 3.2 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<sup>11)</sup>。

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

ここに、 $\sigma$  と  $\varepsilon$  : それぞれ応力とひずみ

$E$  : ヤング率 (=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 3.1 に示す。  $\sigma_{0.2}$  に対して、日本工業規格で規定される 0.2%耐力<sup>12),13)</sup>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る非超過確率 5%に対する値である<sup>11)</sup>。

表 3.1 0.2%耐力とひずみ硬化パラメータの値

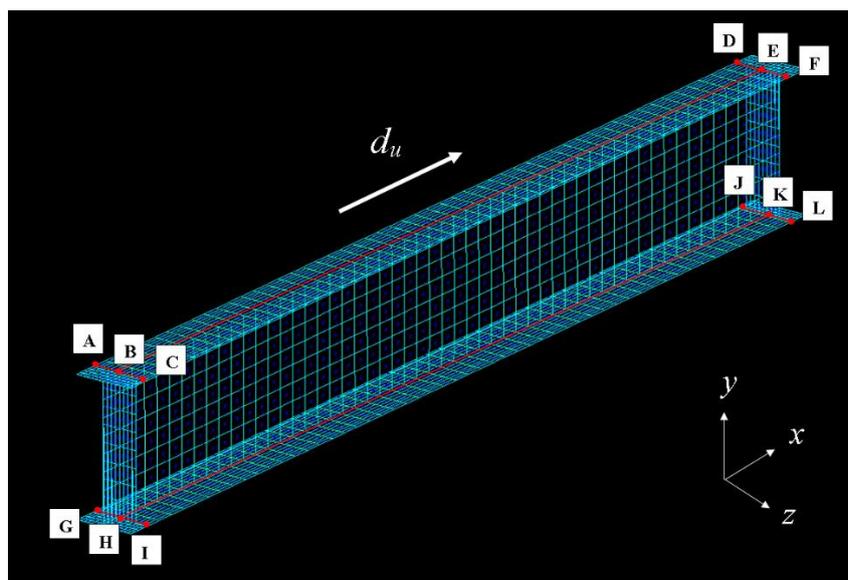
アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$n$
A6061-T6	245	29.1
A5083-O	125	5.3

### 3.3 境界条件

有限要素法解析における境界条件を表 3.2 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 3.2 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



### 3.4 初期たわみ

図 3.2(a)を参照して、無補剛桁に対する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.

$$w_0 = w_{0\max} \sin\left(\frac{m\pi x}{a_L}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_w + t_f}\right) \quad (3.2)$$

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

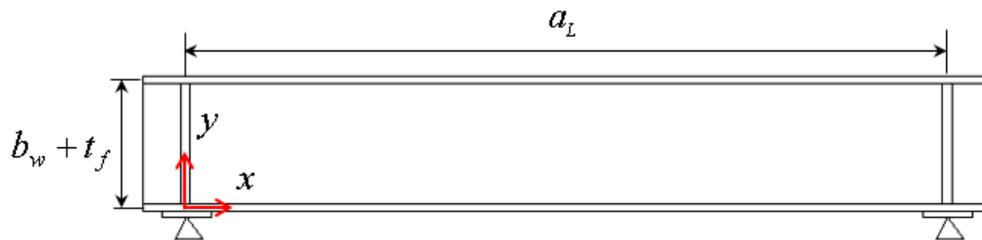
有限要素法解析においては、部材寸法は板厚の中央面を基準として設定される。最大初期たわみ  $w_{0\max}$  に対して、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）<sup>5)</sup>で桁ウェブに対して規定される許容製作精度  $b_w/250$  を与える。ウェブの長さ方向の初期たわみモード

数  $m$  は、両支点上の端補剛材と上下フランジとで囲まれたウェブの縦横比  $a_L/b_w$  が 1.0, 3.0, 6.5 の無補剛桁に対して、それぞれ 1, 2, 5 を採用する。これらの値は、縦横比が 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<sup>6)</sup>。

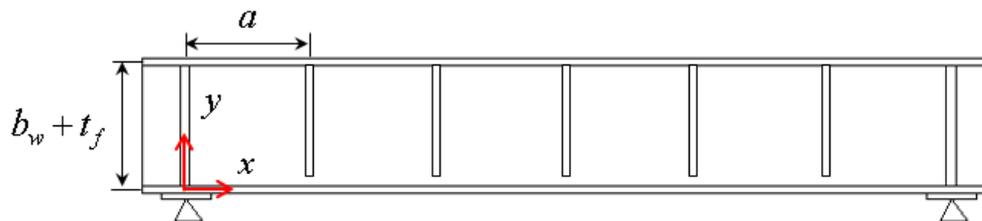
図 3.2 (b) を参照して、中間垂直補剛材を有する A5083-O の桁に対して、隣接する中間垂直補剛材間の一つのウェブパネルの面外方向の初期たわみ  $w_0$  に対して次式を仮定する。

$$w_0 = w_{0\max} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_w + t_f}\right) \quad (3.3)$$

式(3.3)の初期たわみを各ウェブパネルに正負交番させる。  $w_{0\max}$  に対して  $b_w/250$  を与える。



(a) 無補剛桁



(b) 中間垂直補剛材を有する桁

図 3.2 ウェブの初期たわみ

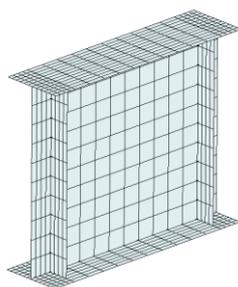
### 3.5 要素分割

汎用有限要素法解析プログラム MARC<sup>14)</sup>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 の縦横比に対して 10 等分割、2.0 以上の縦横比に対して 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

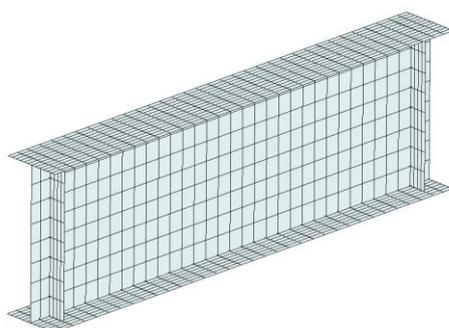
されている<sup>6)</sup>。したがって、ウェブに対して、各有限要素の形状を正方形とし、無補剛桁のウェブの縦横比  $a_l/b_w$  が 1.0 の桁に対して、ウェブの高さ方向を 10 等分割、 $a_l/b_w$  が 3.0 と 6.5 の桁に対して 8 等分割する。

中間垂直補剛材を有する A5083-O の桁に対しては、隣接する中間垂直補剛材と上下フランジとで囲まれたウェブの縦横比  $a_l/b_w$  が 0.5 の桁に対して、ウェブの高さ方向を 16 等分割、 $a_l/b_w$  が 1.0, 1.5, 2.0 の桁に対して 10 等分割する。

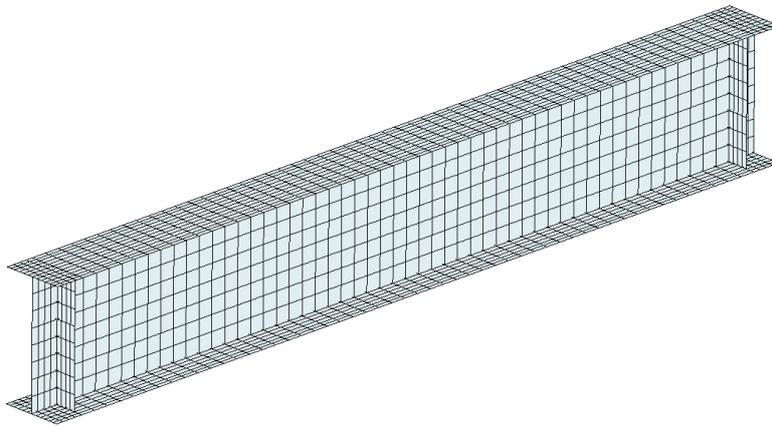
曲げ圧縮を受けるフランジに対して、フランジの全幅方向を 4 等分割以上とすれば十分な精度の解析値が得られることが示されている<sup>7)</sup>。そこで、フランジと端補剛材および中間垂直補剛材に共有節点を持たせることを考慮して、フランジの全幅方向を 8 から 24 の間で等分割する。端補剛材は圧縮を受けるフランジと同様な部材とみなせるので、片側の端補剛材の板幅方向を 4 から 8 の間で等分割する。中間垂直補剛材も板幅方向を 4 から 8 の間で等分割する。無補剛桁の要素分割の一例を図 3.3、中間垂直補剛材を有する桁の要素分割の一例を図 3.4 に示す。端補剛材から外側の張出しの長さは  $12t_w$  としている。



(a)  $a_l/b_w=1.0$

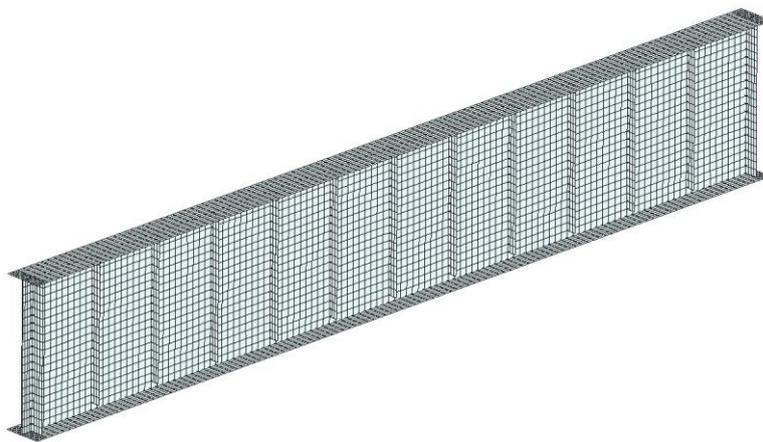


(b)  $a_l/b_w=3.0$

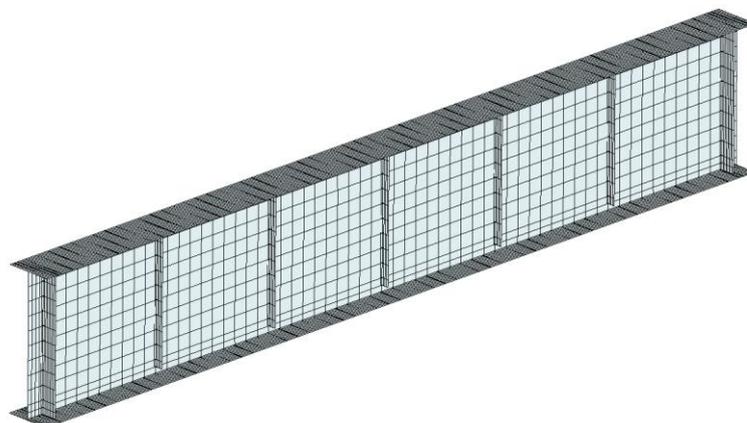


(c)  $a_1/b_w=6.5$

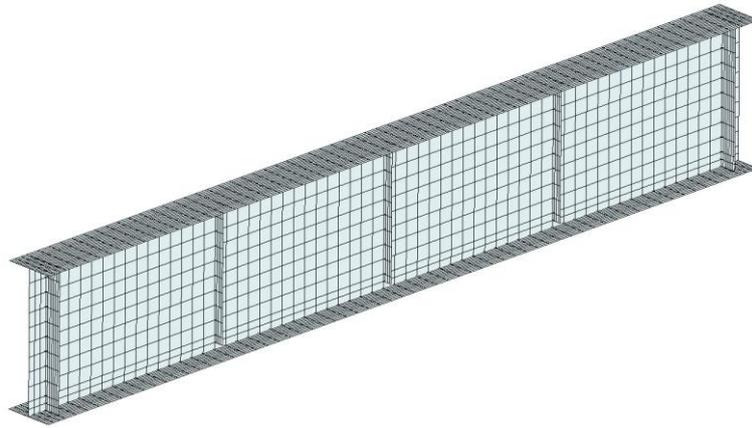
図 3.3 無補剛桁の要素分割



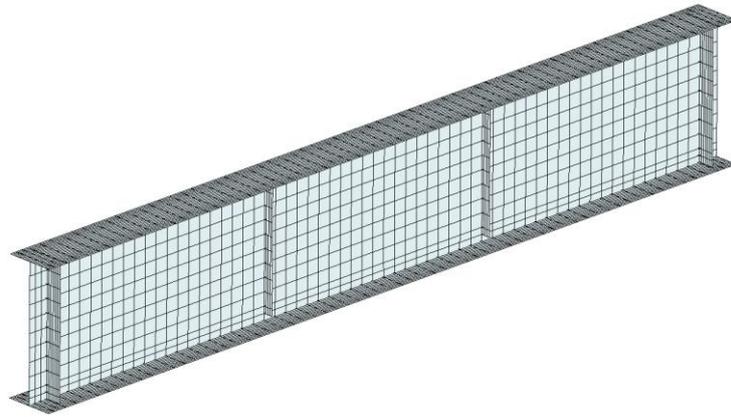
(a)  $a/b_w=0.5$



(b)  $a/b_w=1.0$



(c)  $a/b_w=1.5$



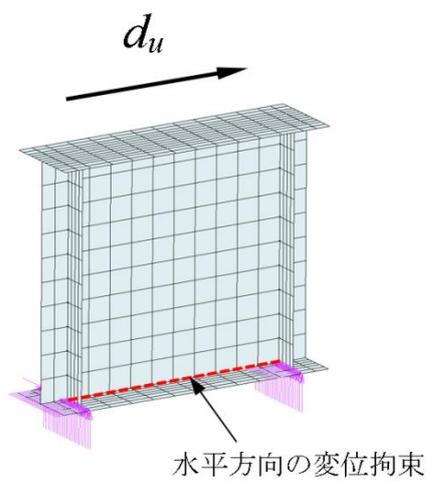
(d)  $a/b_w=2.0$

図 3.4 中間垂直補剛材を有する桁の要素分割

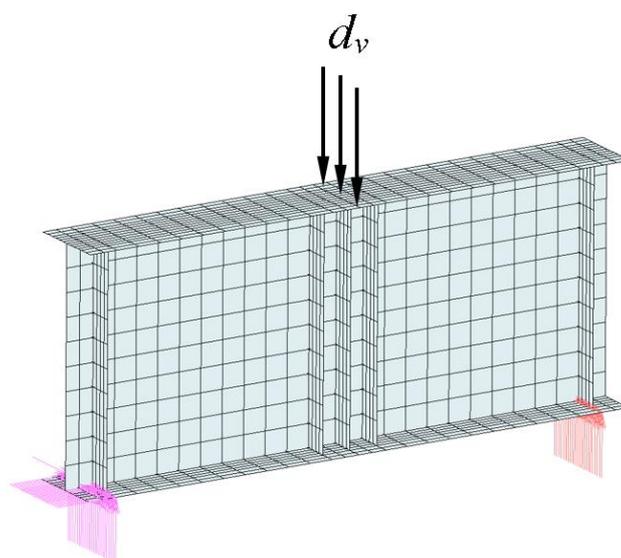
### 3.6 荷重方法

両支点上の端補剛材と上下フランジとで囲まれたウェブの縦横比  $a_l/b_w$  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 3.5(a) に示す水平方向荷重によるせん断力の与え方は 3.3 節で与えられている。図 3.5(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。中間垂直補剛材の板幅は端補剛材と同じであるが、板厚は端補剛材の 3 倍とする。水平方向荷重で仮定された、縦横比  $a_l/b_w$  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 3.3 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

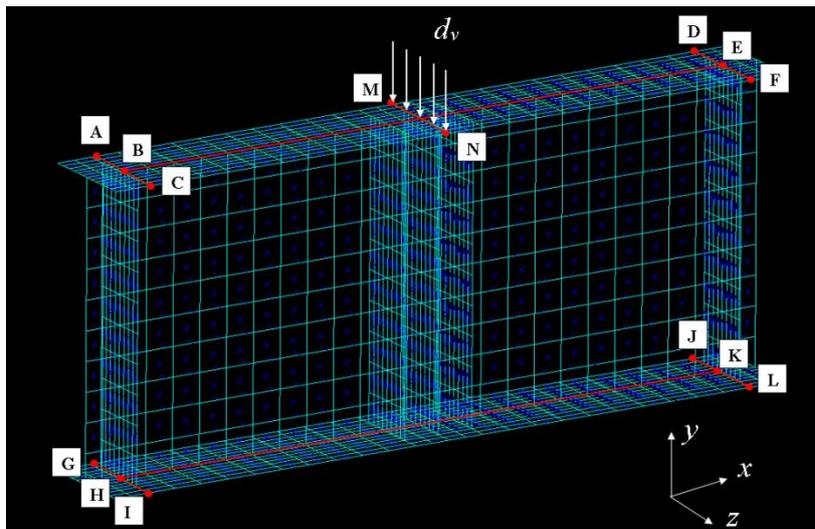


(b) 鉛直方向載荷

図 3.5 載荷方法

表 3.3 境界条件

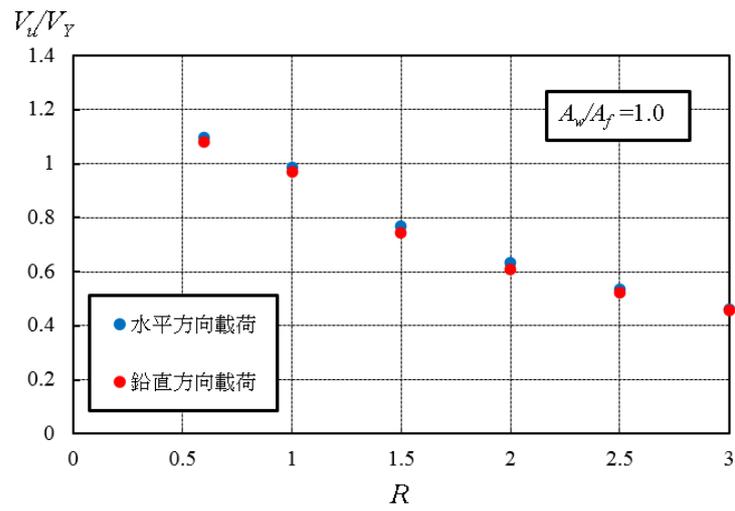
	変位		
	x 軸方向	y 軸方向	z 軸方向
辺 MN	0	強制変位 $d_v$	0
辺 BE, 辺 HK	0	0	1
辺 GI	1	1	1
辺 JL	0	1	1



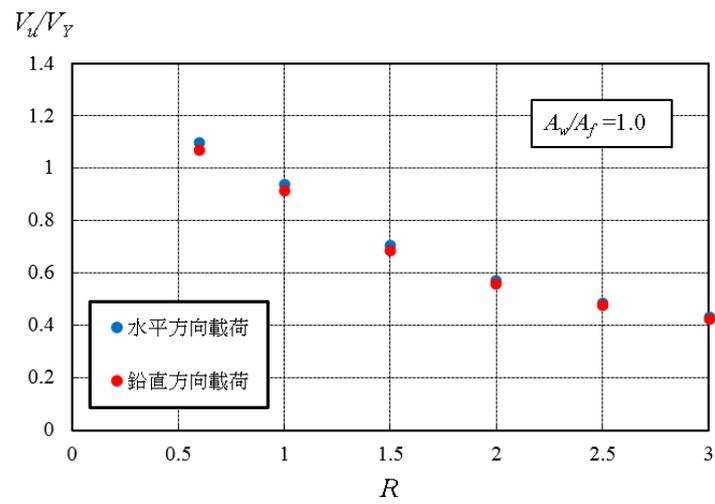
二つの荷重方法に対する桁のせん断耐荷力の比較を図 3.6 に示す. 数値データを付録 D に示す. 図 3.6(a)と(b)は, それぞれアルミニウム合金 A6061-T6 と A5083-O に対する結果である. 式(3.2)の最大初期たわみ  $w_{0max}$  は  $b/250$  である. ウェブとフランジの断面積比  $A_w/A_f$  は 1.0 である. せん断耐荷力  $V_u$  は, FEM 解析で生じる支点反力の最大値である.  $V_y$  は, 第 4 章の式(4.3)で与えられる, ウェブ全体が降伏するときのせん断強度である. 横軸の  $R$  は, 第 4 章で与えられる式(4.5)で定義される幅厚比パラメータである. ここで, 式(4.5)の中の  $F_L$  を 1 とする. 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 3.7 に示す. 両者のウェブの面外変形は同様な形状を示している. さらに, 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 3.8 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.

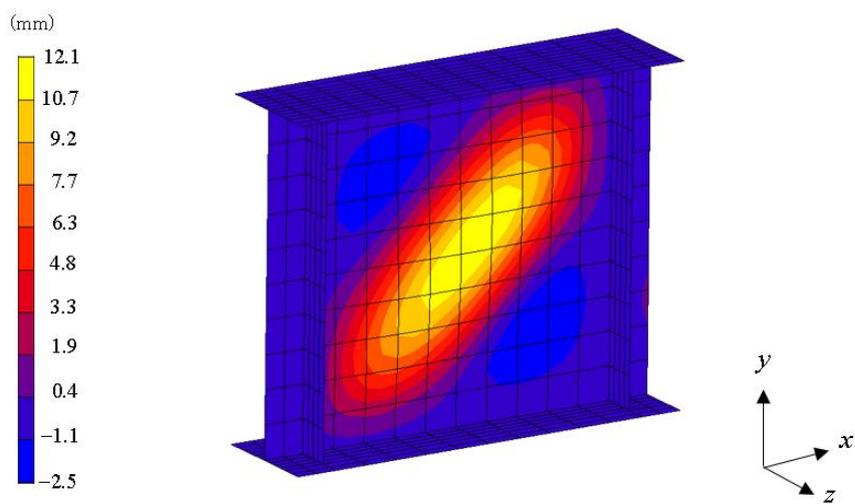


(a) A6061-T6

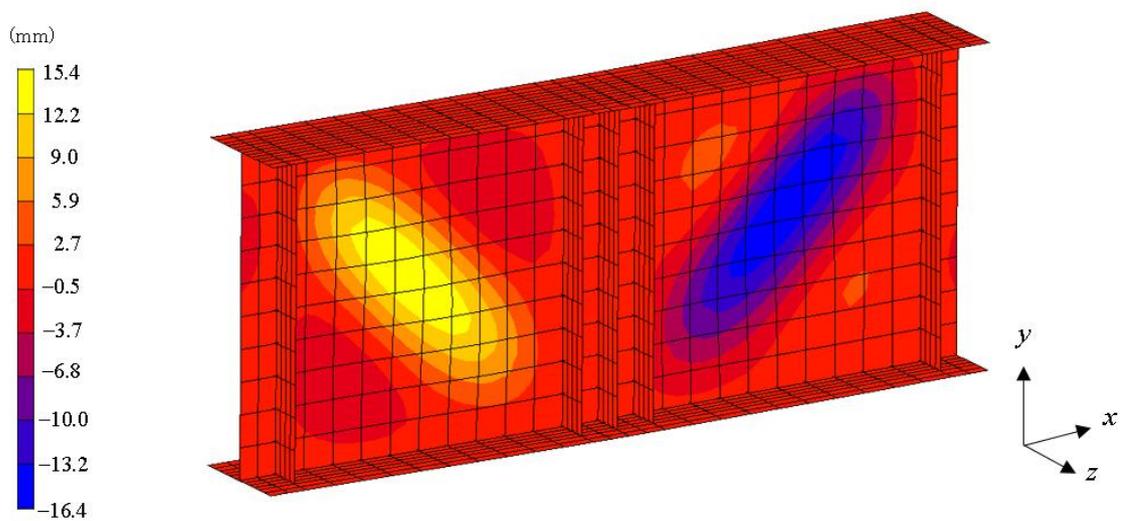


(b) A5083-O

図 3.6 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 3.7 ウェブの面外変形 [A6061-T6,  $R=1.5$ ]

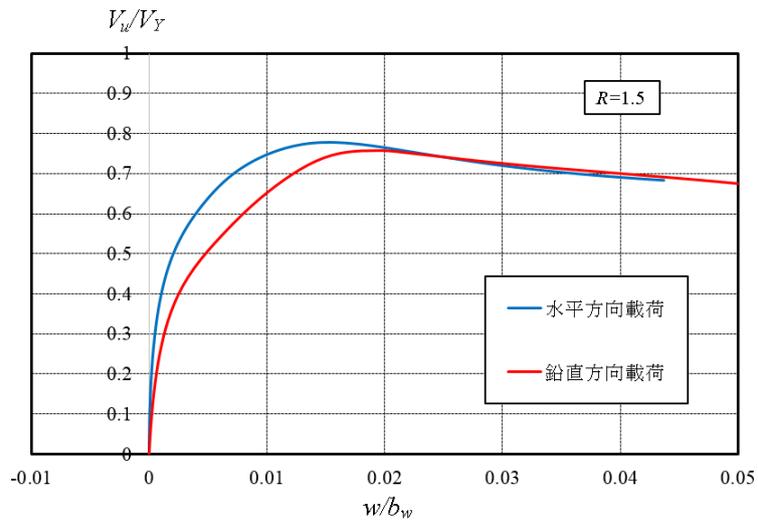


図 3.8 荷重と面外変位の関係 [A6061-T6]

## 第4章 無補剛桁のせん断耐荷力

### 4.1 無補剛桁のせん断耐荷力に影響を与える因子

アルミニウム合金が A6061-T6 に対して、4.2 節で与えられる式(4.5)の幅厚比パラメータ  $R$  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 4.1 に示す。ここで、式(4.5)中の  $F_L$  を 1 とする。  $V_u$  はせん断耐荷力であり、FEM 解析で支点反力の最大値である。  $V_Y$  は、4.2 節の式(4.3)で与えられる、ウェブ全体が降伏するときのせん断強度である。図 4.1 (a) と (b) は、両支点上の端補剛材と上下フランジとで囲まれたウェブの縦横比  $a_L/b_w$  がそれぞれ 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(3.2)の最大初期たわみ  $w_{0max}$  が  $b/250$  の他に  $b/20000$  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荷力は次の三つで構成される<sup>15)</sup>。

$$V_u = V_{cr} + V_t + V_f \quad (4.1)$$

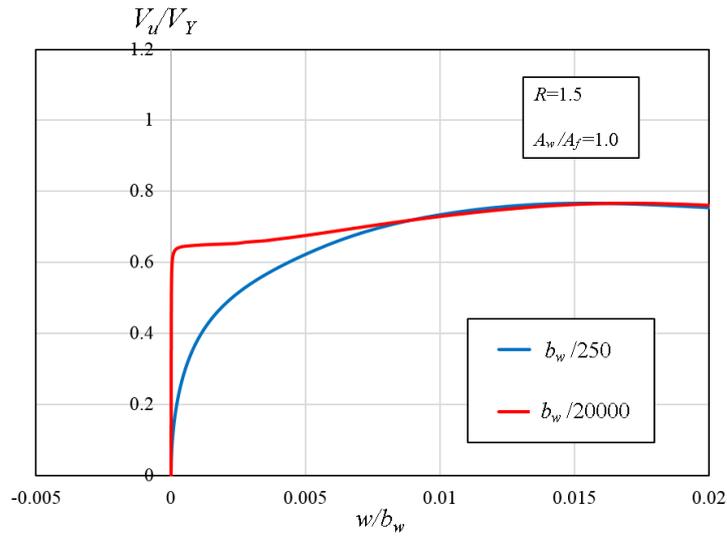
ここに、  $V_u$  : 桁のせん断耐荷力

$V_{cr}$  : ウェブのせん断座屈強度によって負担されるせん断力

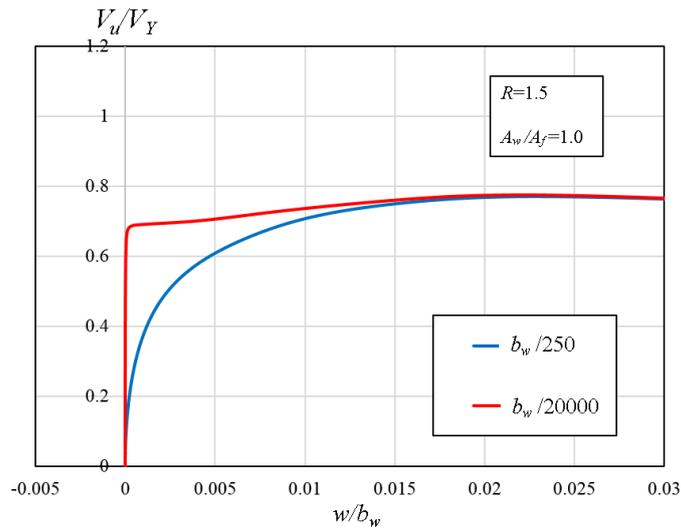
$V_t$  : ウェブの斜張力場作用によって負担されるせん断力

$V_f$  : 上下フランジと端補剛材と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 4.1 の各図に示すように、最大初期たわみ  $w_{0max}$  が  $b/250$  と  $b/20000$  に対するせん断耐荷力は同じである。  $w_{0max}=b/250$  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、  $w_{0max}=b/20000$  に対する  $V_u/V_Y-w/b_w$  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  $\Delta^2$  法<sup>16)</sup>によって  $V_{cr}$  の推定精度を上げることができる。



(a)  $a_L/b_w=1.0$



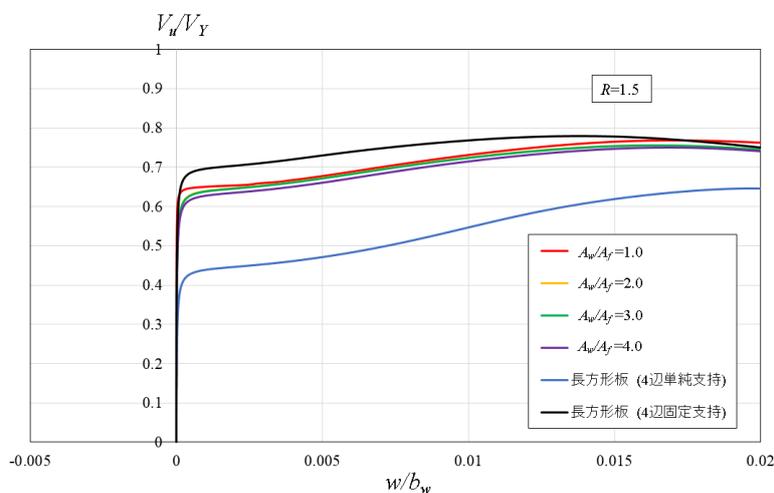
(b)  $a_L/b_w=6.5$

図 4.1 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

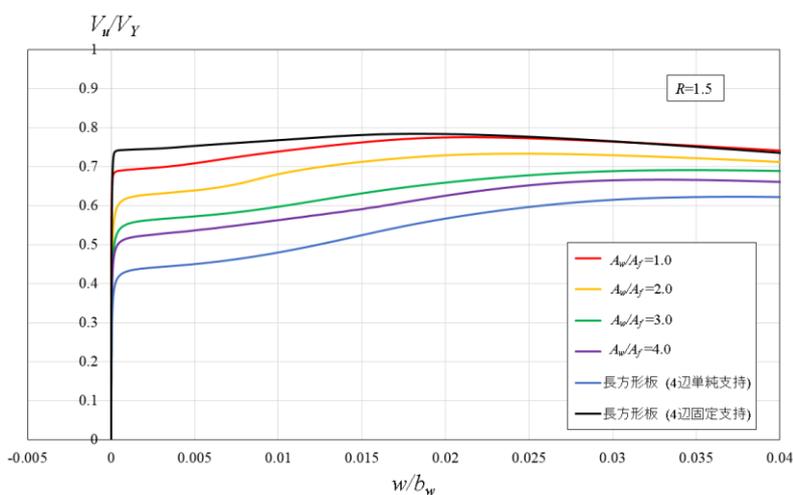
$w_{0max}=b/20000$  に対する、前述のアルミニウム合金桁の荷重とウェブの面外変位の関係を図 4.2 に示す。ウェブとフランジの断面積比  $A_w/A_f$  を変化させている。 $a_L/b_w=6.5$  で  $A_w/A_f=1.0$  の場合、桁が終局強度に達したとき、および終局強度に対して 10%ほど強度が低下したときのウェブの面外変形を図 4.3 に示す。桁が終局強度に達するまでは、ウェブ中心、すなわち  $(0.5a_L, 0.5b_w)$  の位置の面外変位が最大となるが、桁が終局強度に達した後は、 $(0.6a_L, 0.5b_w)$  の位置のウェブの面外変位が最大となる。他方、 $a_L/b_w=6.5$  で  $A_w/A_f=1.0$  の場合以外で

は、図 4.4 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 4.2 では、 $a_L/b_w=6.5$  で  $A_w/A_f=1.0$  の場合のみ、 $(0.6a_L, 0.5b_w)$  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 4.2 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 4.1 に示す。この境界条件は文献 6) 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)  $a_L/b_w=1.0$



(b)  $a_L/b_w=6.5$

図 4.2  $V_u/V_Y-w/b_w$  の関係 [A6061-T6]

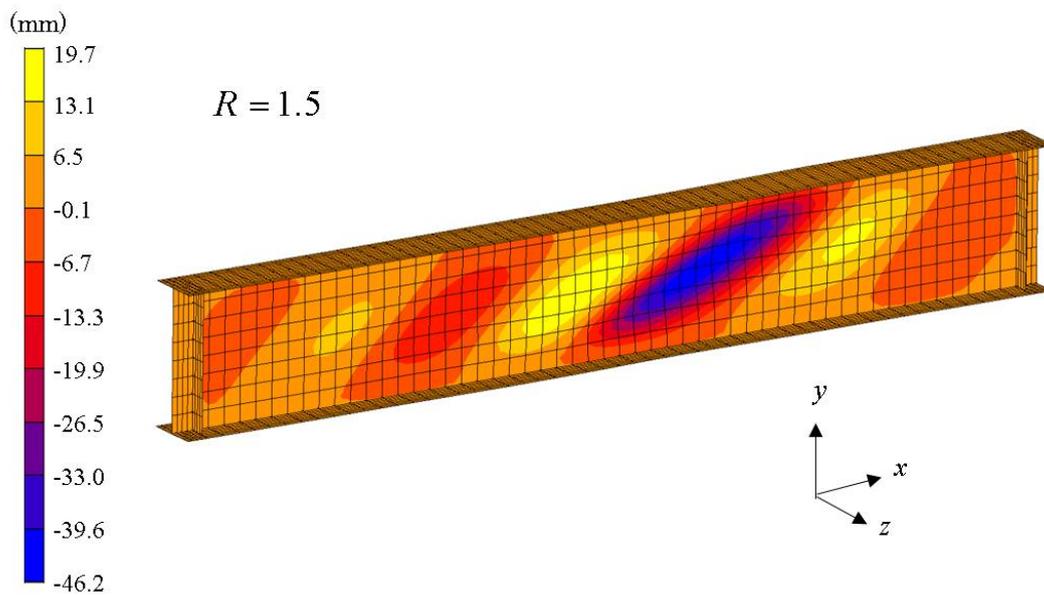
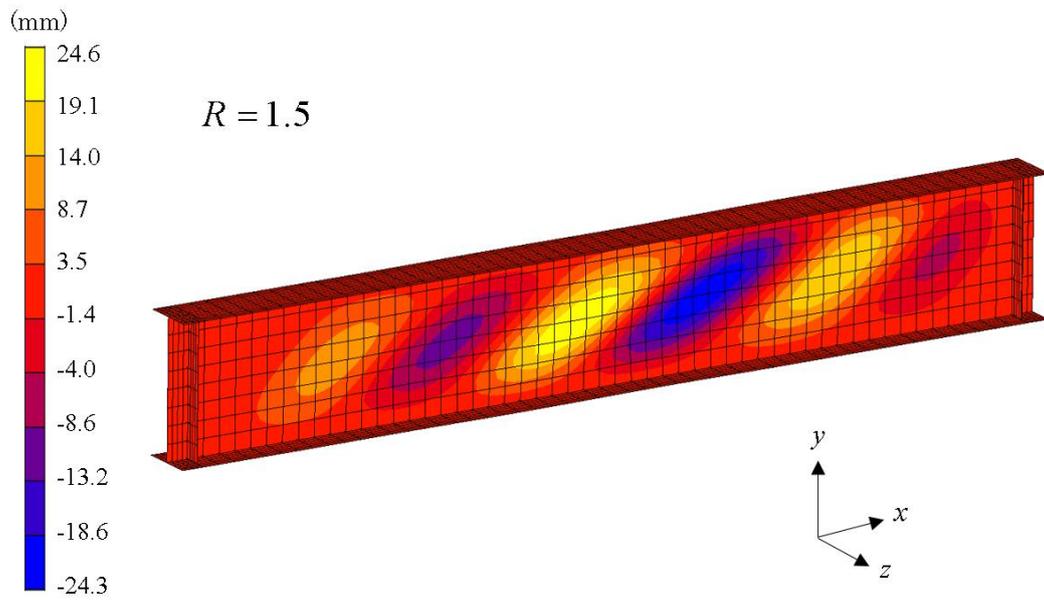
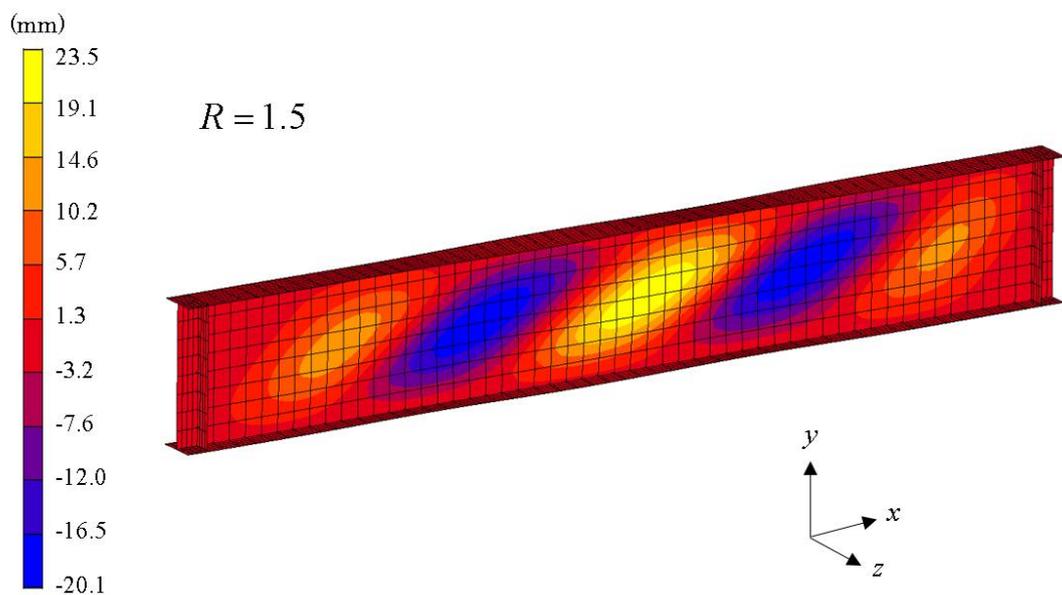
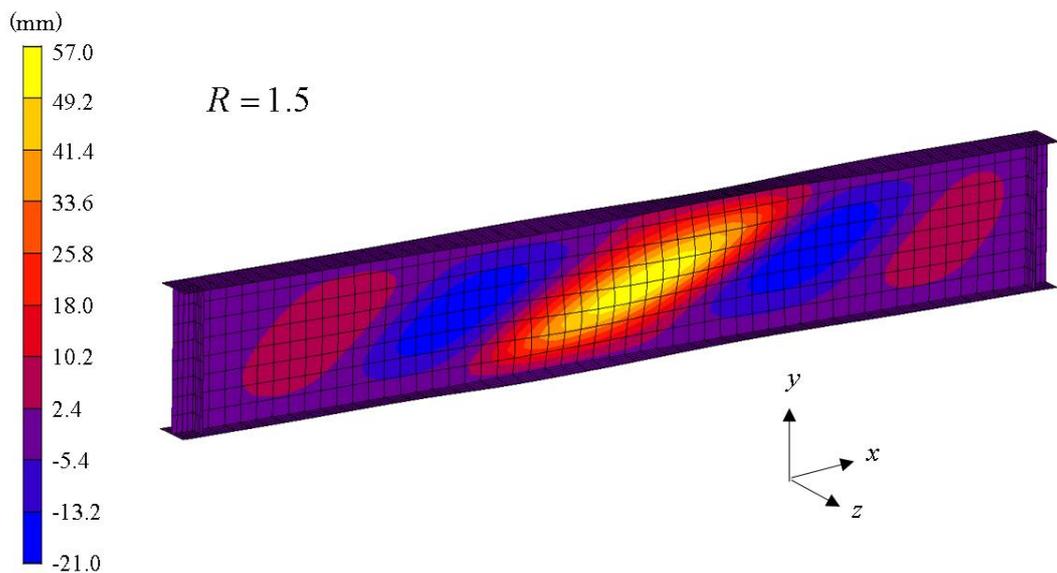


図 4.3  $a_l/b_w=6.5$  で  $A_w/A_f=1.0$  の場合に対する終局時とその後のウェブの面外変形



(a)  $Vu/V_Y=0.73$  (終局時)



(b)  $Vu/V_Y=0.66$  (終局後)

図 4.4  $a_L/b_w=6.5$  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 4.1 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 4.2 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 4.2 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 4.2 節の式(4.3)で与えられる, ウェブ全体が降伏するときのせん断強度である. 4.2 節で与えられる式(4.5)の幅厚比パラメータ  $R$  (ここで,  $F_L$  を 1 とする) のせん断座屈係数  $k_L$  は縦横比  $a_L/b_w$  によって変わるので,  $R=1.5$  に対して,  $a_L/b_w=1.0$  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 4.2 から次のことが分かる.

- (1)  $a_L/b_w=1.0$  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)  $a_L/b_w=6.5$  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)  $a_L/b_w$  が  $1.0$  と  $6.5$  とともに, 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, 中間垂直補剛材を有する鋼桁において, 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 17) に沿った結果である. しかし, 無補剛のアルミニウム合金桁においては, 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 4.2  $V_{cr}/V_u$  の値および  $(V_u - V_{cr})/V_u$  の値

(a)  $a_l/b_w=1.0$

			$\frac{V_u}{V_Y}$	$\frac{V_{cr}}{V_Y}$	$\frac{V_{cr}}{V_u}$	$\frac{V_u - V_{cr}}{V_u}$
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)  $a_l/b_w=6.5$

			$\frac{V_u}{V_Y}$	$\frac{V_{cr}}{V_Y}$	$\frac{V_{cr}}{V_u}$	$\frac{V_u - V_{cr}}{V_u}$
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

#### 4.2 無補剛桁のせん断耐荷力の推定式

4 辺単純支持された長方形板のせん断耐荷力の推定式が既に与えられている<sup>6)</sup>。しかし、前節で述べたように、ウェブのせん断座屈強度は、4 辺単純支持された場合と 4 辺固定支持された場合の間にあり、断面積比  $A_w/A_f$  および縦横比  $a_l/b_w$  の値に依存して変化する。これを考慮して、無補剛桁のせん断耐荷力の推定式として次式を仮定する。

$$\frac{V_u}{V_Y} = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ \frac{Q_1}{R} - \frac{Q_2}{R^2} & (R_1 \leq R \leq R_2) \\ 0.8 \left( \frac{R_2}{R} \right)^p & (R_2 \leq R \leq 3) \end{cases} \quad (4.2)$$

$$V_Y = \tau_{0.2} b_w t_w = \frac{\sigma_{0.2}}{\sqrt{3}} b_w t_w \quad (4.3)$$

$$\tau_{0.2} = \frac{\sigma_{0.2}}{\sqrt{3}} \quad (4.4)$$

$$R = \frac{1}{\pi} F_L \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k_L}} \sqrt{\frac{\tau_{0.2}}{E}} \frac{b_w}{t_w} \quad (4.5)$$

$$k_L = \begin{cases} 4 + \frac{5.34}{(a_L/b_w)^2} & (0 < a_L/b_w \leq 1) \\ 5.34 + \frac{4}{(a_L/b_w)^2} & (1 < a_L/b_w) \end{cases} \quad (4.6)$$

- ここに、 $V_u$  : 桁のせん断耐荷力  
 $V_Y$  : ウェブ全体が降伏するときのせん断強度  
 $\tau_{0.2}$  : 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ウェブの幅厚比パラメータ  
 $R_1, R_2$  : ウェブの幅厚比パラメータの値  
 $Q_1, Q_2, p$  : 定数  
 $F_L$  : 係数  
 $k_L$  : 4辺単純支持された長方形板のせん断座屈係数  
 $\mu$  : ポアソン比 (=0.3)  
 $E$  : ヤング率 (=70GPa)  
 $a_L$  : 両支持点上の端補剛材の間隔 (図 3.1(a) 参照)  
 $b_w$  : ウェブの高さ  
 $t_w$  : ウェブの板厚

$\sigma_{0.2}, R_1, R_2, Q_1, Q_2, p$  の値を表 4.3 に示す<sup>6)</sup>。

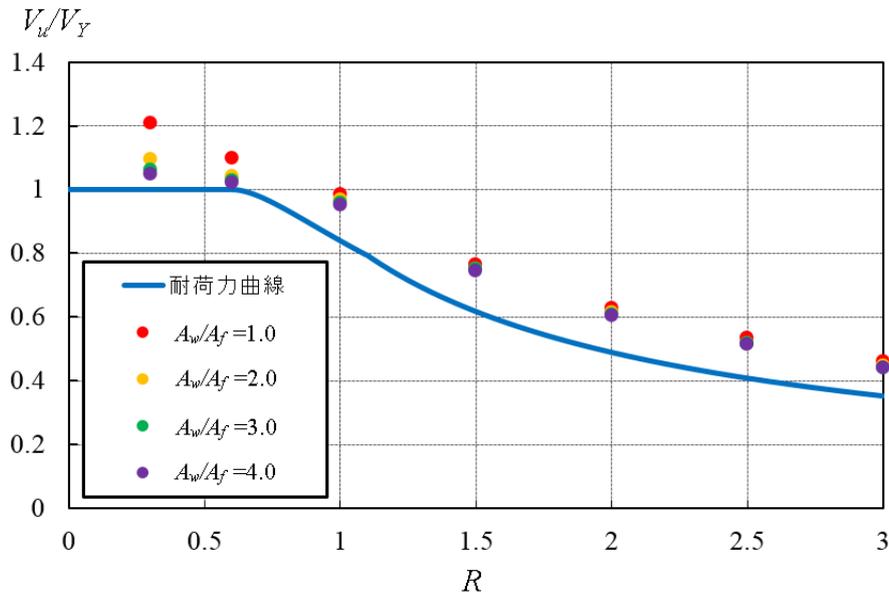
表 4.3  $\sigma_{0.2}, R_1, R_2, Q_1, Q_2, p$  の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$R_1$	$R_2$	$Q_1$	$Q_2$	$p$
A6061-T6	245	0.60	1.09	1.2	0.36	0.81
A5083-O	125	0.53	0.92	1.02	0.26	0.76

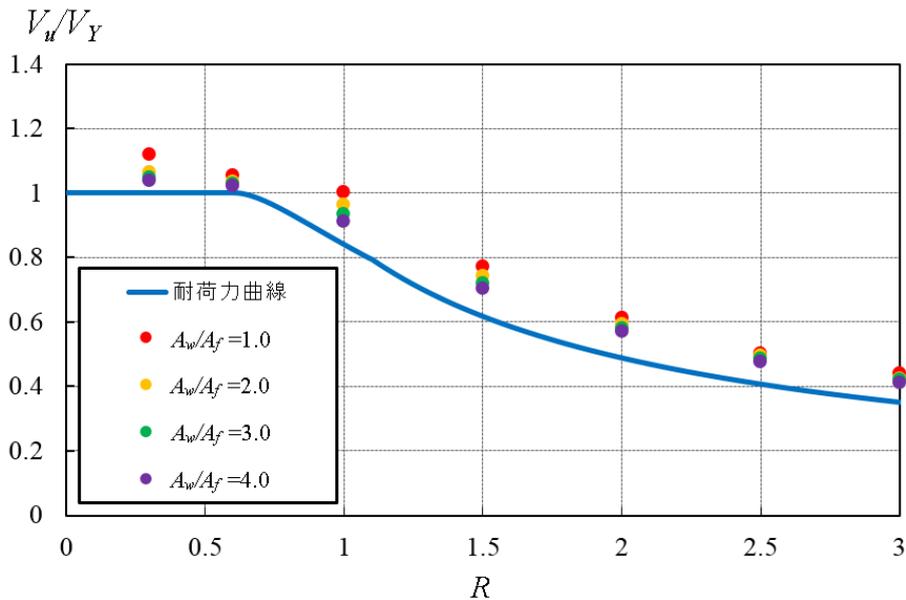
式(4.5)の  $F_L$  が 1 の場合、式(4.2)は、4辺単純支持された長方形板のせん断耐荷力を与える式である<sup>6)</sup>。文献 6)の式(12)で与えられるせん断耐荷力の適用範囲は  $R \leq 2.0$  であったが、A6061-T6 に対して、この適用範囲が  $R \leq 3.0$  に拡張できることが示された<sup>18)</sup>。さらに、A5083-O に対しても、この適用範囲が  $R \leq 3.0$  に拡張できることを付録 F に示す。さらに、

文献 6)の式(12)は、式(4.6)に示すように、長方形板の縦横比が 1 以下の場合にも適用できることを付録 G に示す。

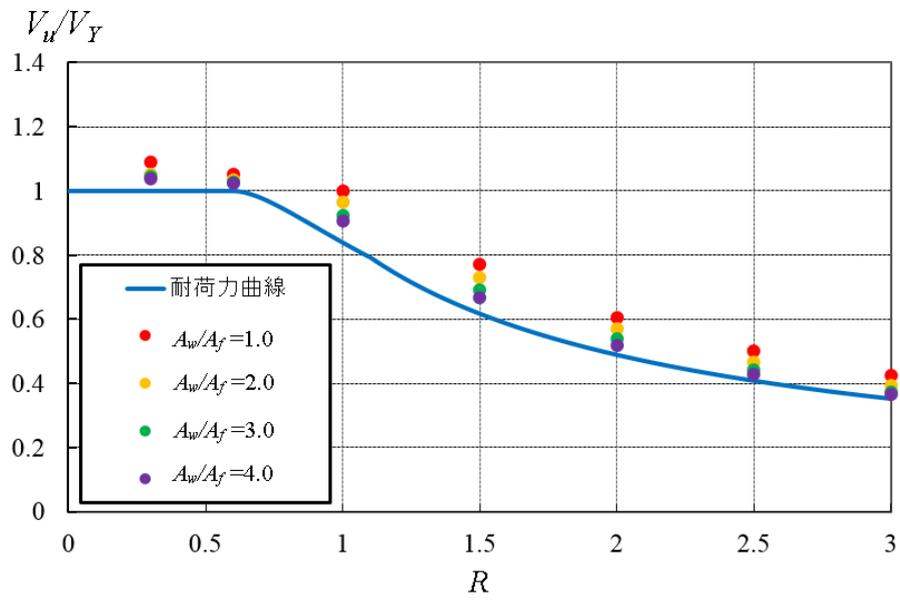
FEM 解析で得られる耐荷力を、アルミニウム合金 A6061-T6 と A5083-O に対して、それぞれ図 4.5 と 4.6 に示す。数値データを付録 H に示す。式(3.2)の最大初期たわみ  $w_{0\max}$  は  $b/250$  である。各図には、式(4.2)で与えられる耐荷力曲線も示してある。ここで、式(4.5)の  $F_L$  の値を 1 としている。



(a)  $a_L/b_w=1.0$

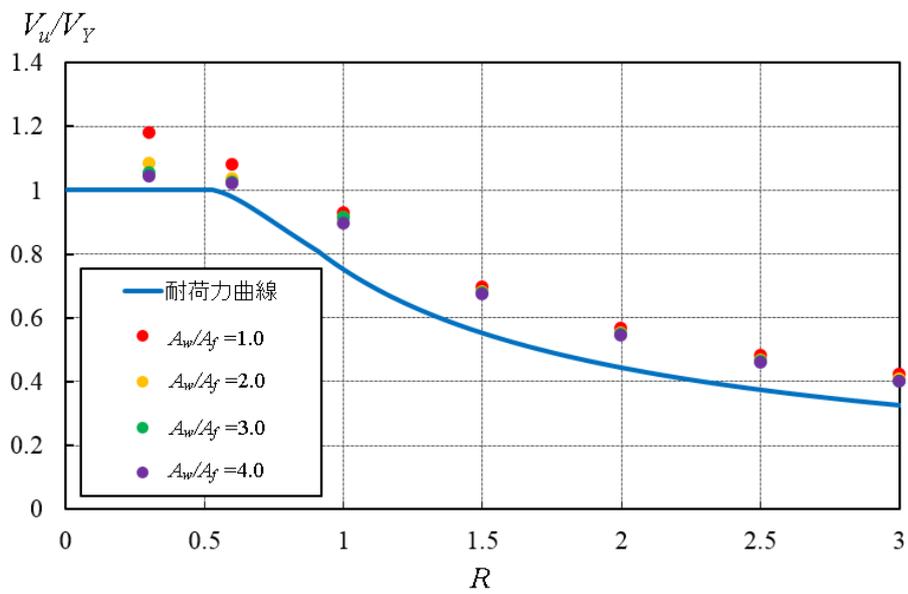


(b)  $a_L/b_w=3.0$

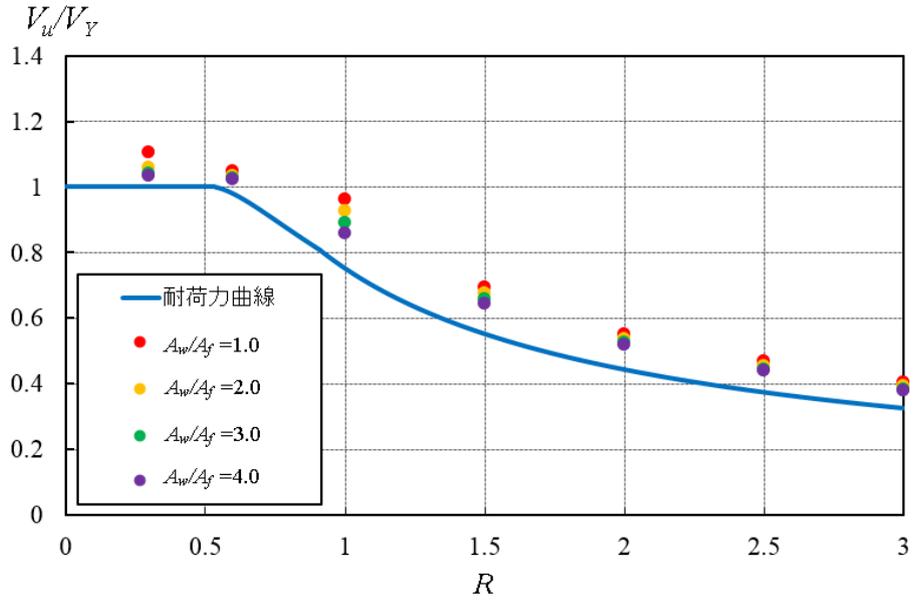


(c)  $a_1/b_w=6.5$

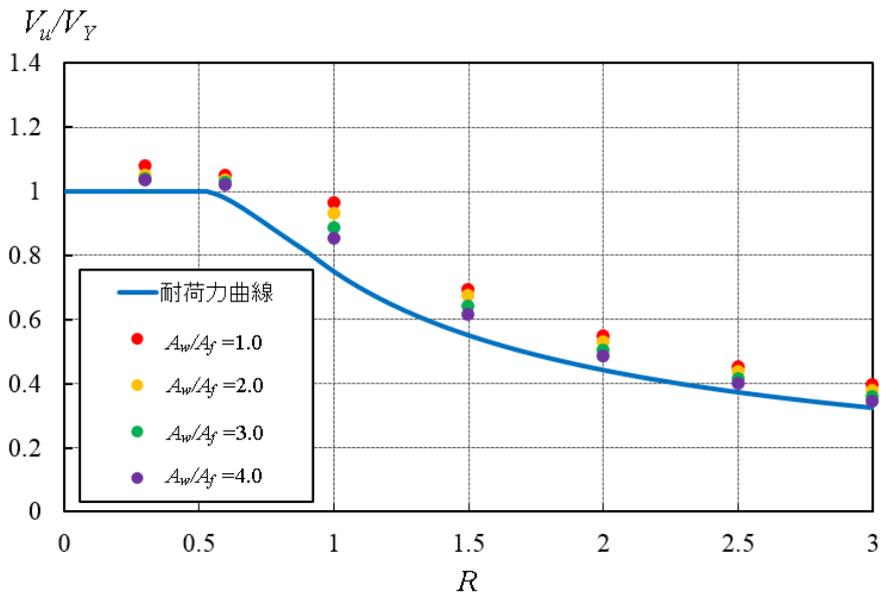
図 4.5  $V_u/V_Y$  と  $R$  の関係 [A6061-T6]



(a)  $a_1/b_w=1.0$



(b)  $a_1/b_w = 3.0$



(c)  $a_1/b_w = 6.5$

図 4.6  $V_u/V_Y$  と  $R$  の関係 [A5083-O]

式(4.5)の幅厚比パラメータ  $R$  に用いられている座屈係数  $k_L$  は 4 辺単純支持の場合に対するものである。したがって、図 4.5 と 4.6 に示すように、解析値の中には耐荷力曲線よりかなり上に分布しているものがある。

式(4.5)の座屈係数  $k_L$  を大きくとることによって、解析値を耐荷力曲線に近づけることを

考える。そこで、 $A_w/A_f$ の各断面積比に対して、解析値が式(4.2)の耐荷力曲線を下回らない値を式(4.5)の $F_L$ に採用する。係数 $F_L$ と断面積比 $A_w/A_f$ の関係を表4.4に示し、両者の関係を図4.7に示す。同図には、次式で与えられる $F_L$ と $A_w/A_f$ の関係に対する近似式も描いてある。

$$F_L = 0.0085 \frac{A_w}{A_f} \frac{a_L}{b_w} + 0.75 \quad (4.7)$$

ここに、 $1.0 \leq \frac{A_w}{A_f} \leq 4.0$ ,  $1.0 \leq \frac{a_L}{b_w} \leq 6.5$

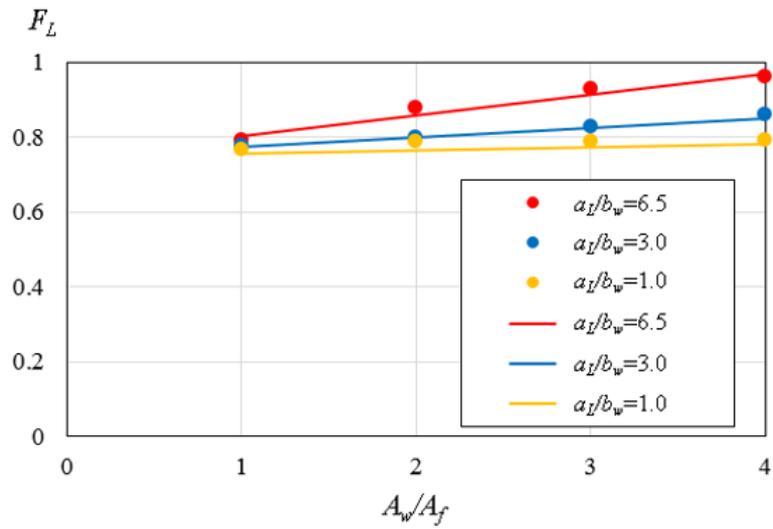
表 4.4 係数 $F_L$ と断面積比 $A_w/A_f$ の関係

(a) A6061-T6

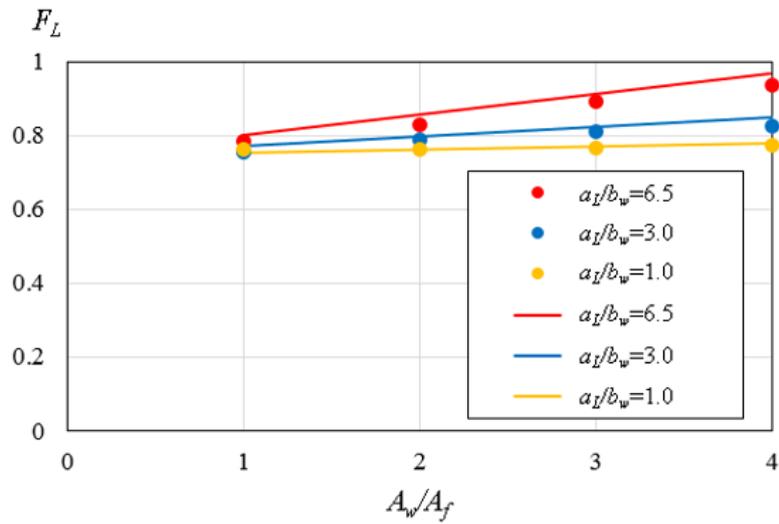
	$A_w/A_f$	$F_L$
$a_L/b_w=1.0$	1.0	0.767
	2.0	0.787
	3.0	0.787
	4.0	0.793
$a_L/b_w=3.0$	1.0	0.776
	2.0	0.80
	3.0	0.827
	4.0	0.860
$a_L/b_w=6.5$	1.0	0.793
	2.0	0.877
	3.0	0.930
	4.0	0.960

(b) A5083-O

	$A_w/A_f$	$F_L$
$a_l/b_w=1.0$	1.0	0.760
	2.0	0.760
	3.0	0.767
	4.0	0.773
$a_l/b_w=3.0$	1.0	0.755
	2.0	0.787
	3.0	0.810
	4.0	0.823
$a_l/b_w=6.5$	1.0	0.784
	2.0	0.827
	3.0	0.890
	4.0	0.937



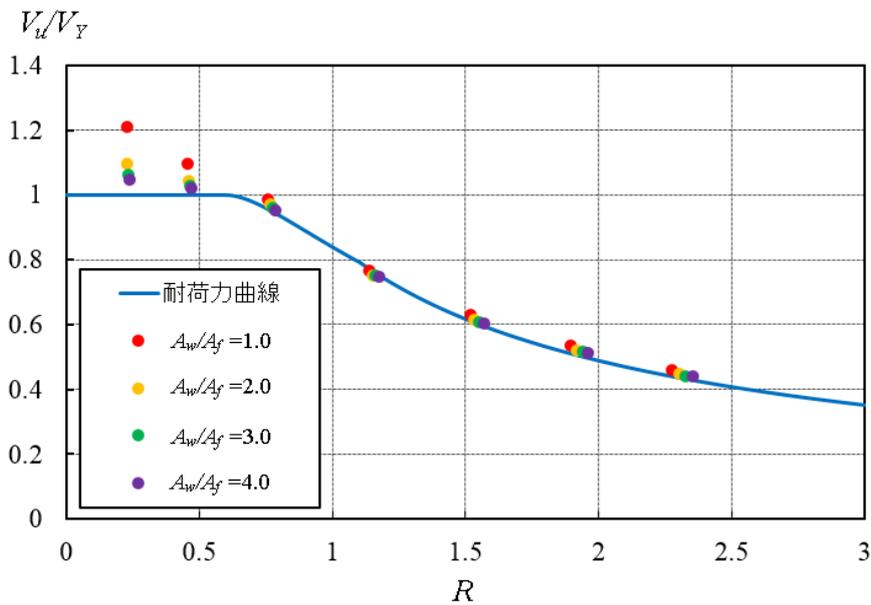
(a) A6061-T6



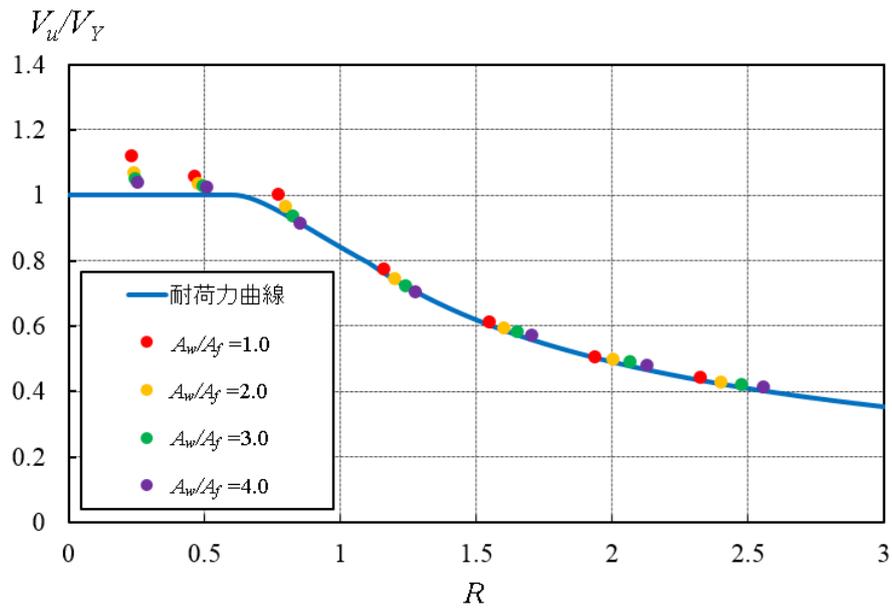
(b) A5083-O

図 4.7  $F_L$  と  $A_w/A_f$  の関係

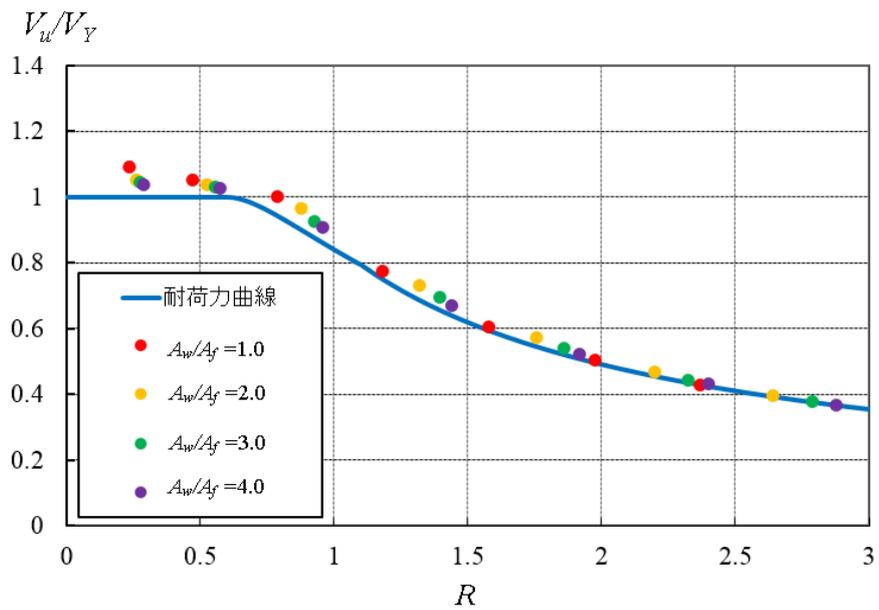
$F_L$  に式(4.7)が使用された式(4.5)の  $R$  によってプロットされた解析値と式(4.2)の耐荷力曲線の比較を, A6061-T6 と A5083-O に対して, それぞれ図 4.8 と 4.9 に示す. さらに, 図 4.8 と 4.9 をまとめ直したものを図 4.10 に示す. 解析値が耐荷力曲線の近くに分布している.



(a)  $a_l/b_w=1.0$

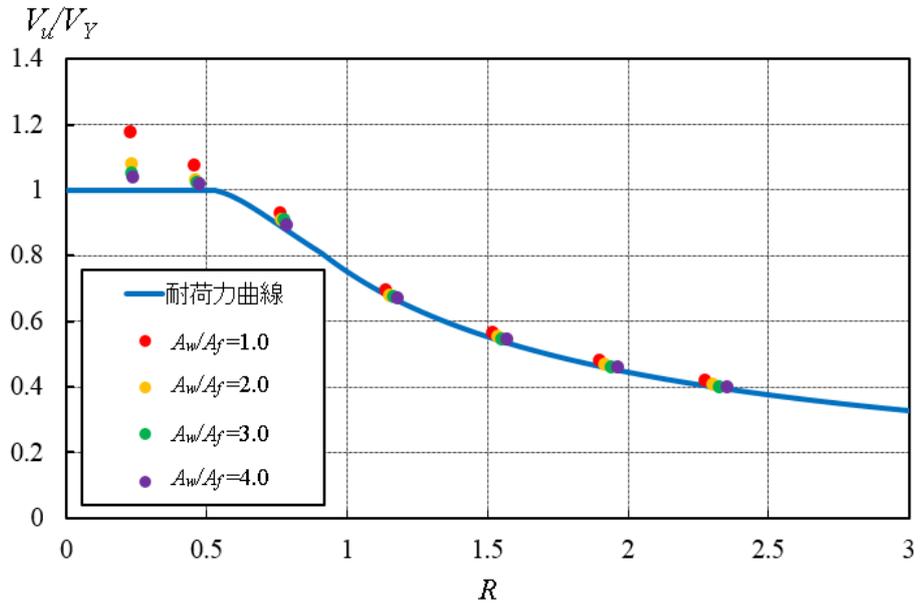


(b)  $a_L/b_w = 3.0$

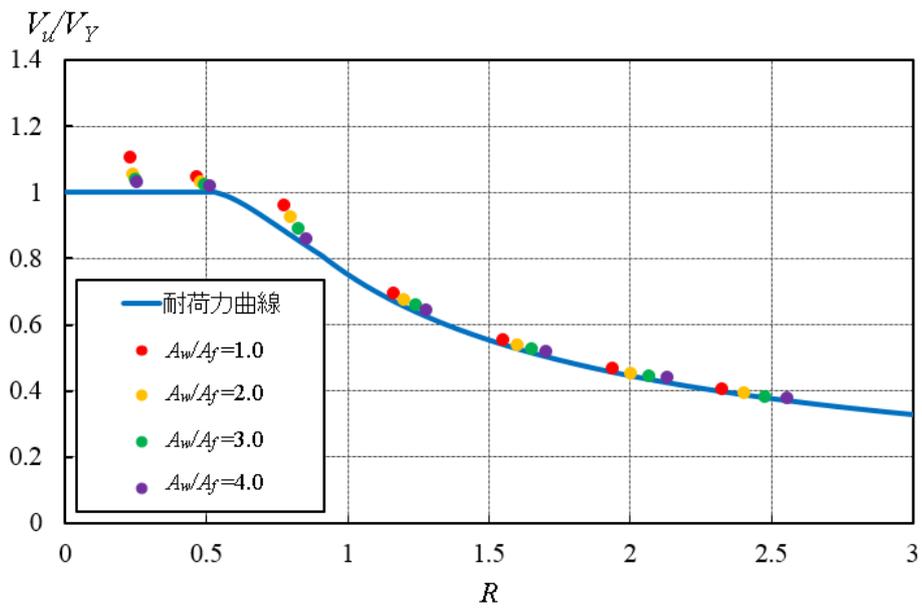


(c)  $a_L/b_w = 6.5$

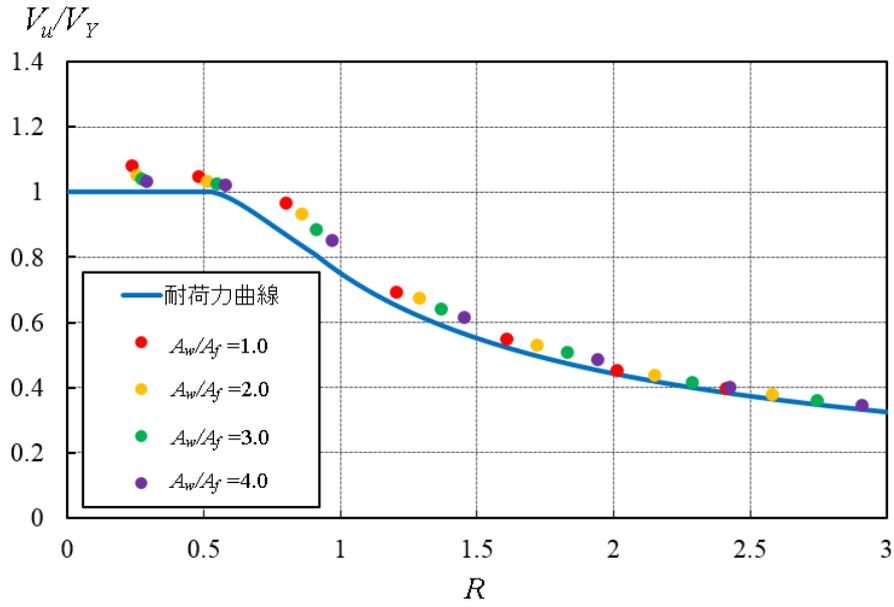
図 4.8  $V_u/V_Y$  と  $R$  の関係 [A6061-T6]



(a)  $a_I/b_w=1.0$

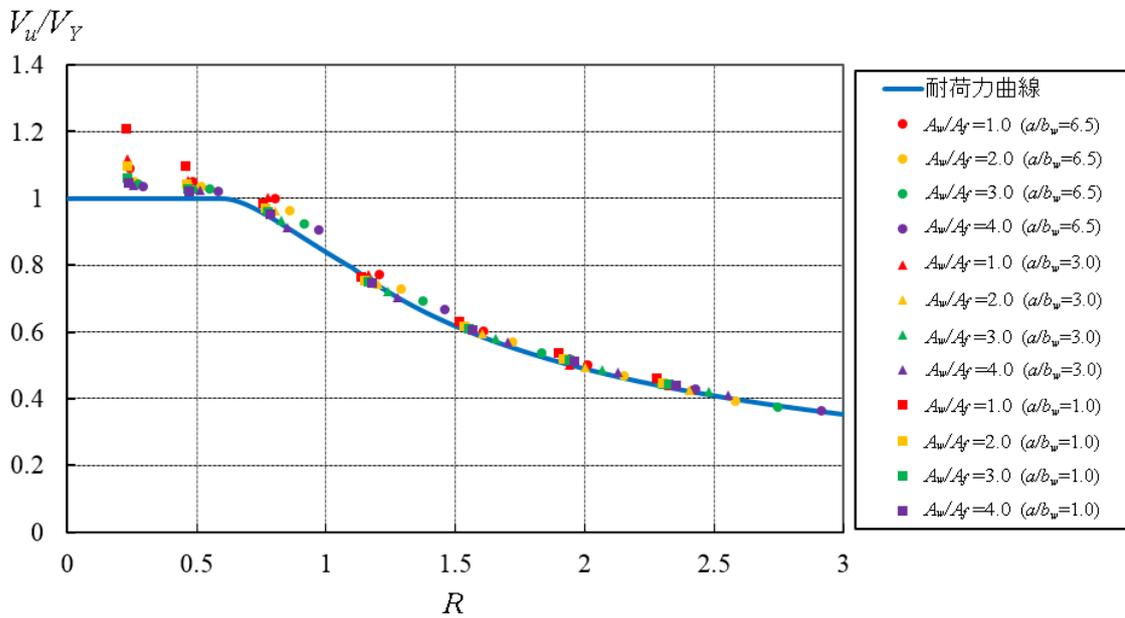


(b)  $a_I/b_w=3.0$

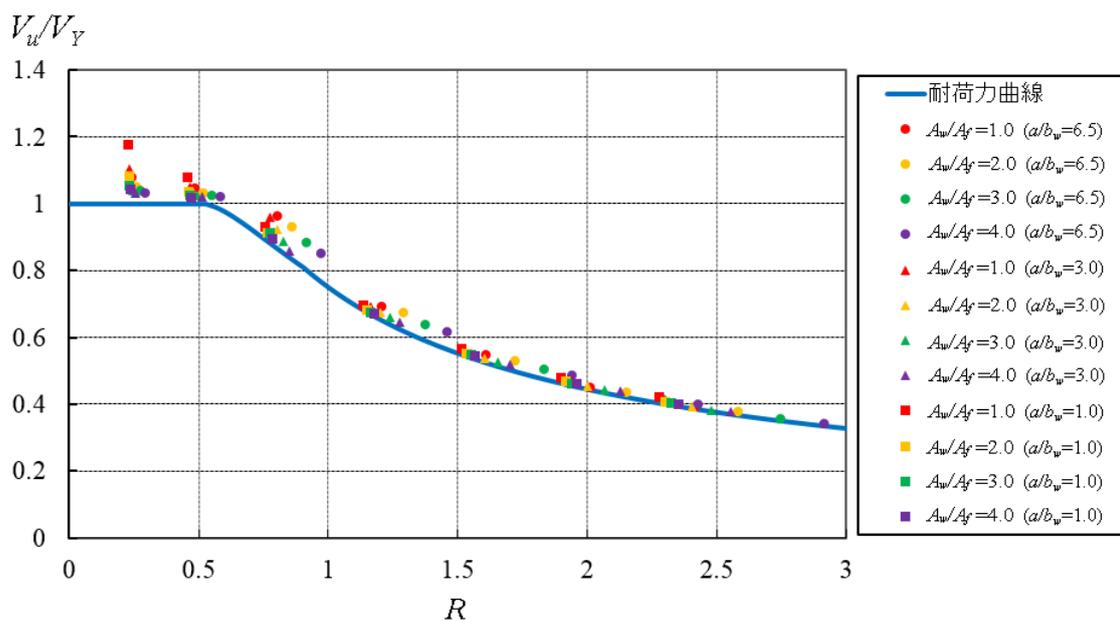


(c)  $a_1/b_w = 6.5$

図 4.9  $V_u/V_Y$  と  $R$  の関係 [A5083-O]



(a) A6061-T6



(b) A5083-O

図 4.10  $V_u/V_Y$  と  $R$  の関係

A5083-O で  $A_w/A_f=1.0$  の場合， $a_L/b_w$  が 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 の各桁に対して，耐荷力の解析値と式(4.7)の  $F_L$  が使用された式(4.2)によって推定される耐荷力の値の比較を表 4.5 に示す．ここで， $a_L/b_w=0.5$  に対して式(4.7)が適用できると仮定している．耐荷力の解析値は，係数  $F_L$  を用いて推定された耐荷力の値より，4%～9%ほど大きい．

表 4.5 縦横比が 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 の無補剛桁の解析値と推定値の比較 [A5083-O]

$a_L/b_w$	$F_L$	$R$	$V_u/V_Y$		解析値 推定値
			解析値	推定値	
0.5	0.754	0.754	0.969	0.895	1.08
1.0	0.759	0.759	0.931	0.893	1.04
1.5	0.763	0.763	0.940	0.890	1.06
2.0	0.767	0.767	0.972	0.888	1.09

注記：  $A_w/A_f=1.0$

## 第5章 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁のせん断耐荷力

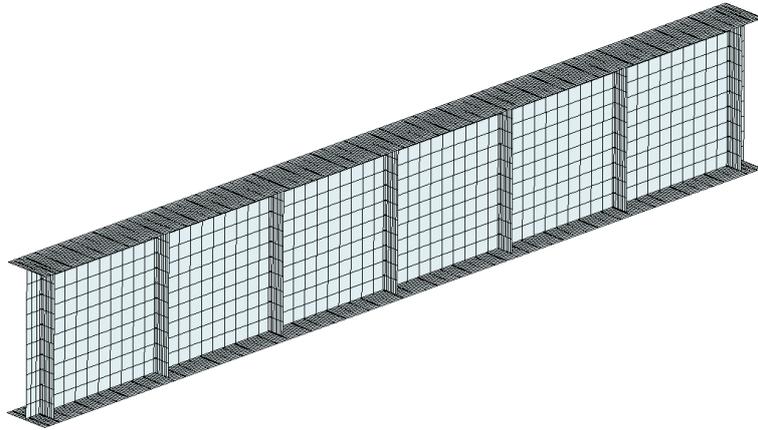
### 5.1 道路橋示方書で規定される中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁のせん断耐荷力

道路橋示方書<sup>19)</sup>で規定される中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁のせん断耐荷力を明らかにするために、表 5.1 に示す A, B, C の解析モデルに対して、FEM による弾塑性有限変位解析を行う。これらの解析モデルは、図 5.1 に示すように、いずれも、両支点間の長さがウェブ高の 6 倍の桁である。隣接する中間垂直補剛材と上下フランジとで囲まれたウェブの縦横比  $a/b_w$  は 1.0 である。ここで、 $a$  は隣接する中間垂直補剛材の間隔である [図 3.1 (b) 参照]。表 5.1 の解析モデル O は第 4 章で与えられた、端補剛材だけをもつ桁である。各解析モデルのウェブとフランジの断面積比  $A_w/A_f$  は 1.0 である。

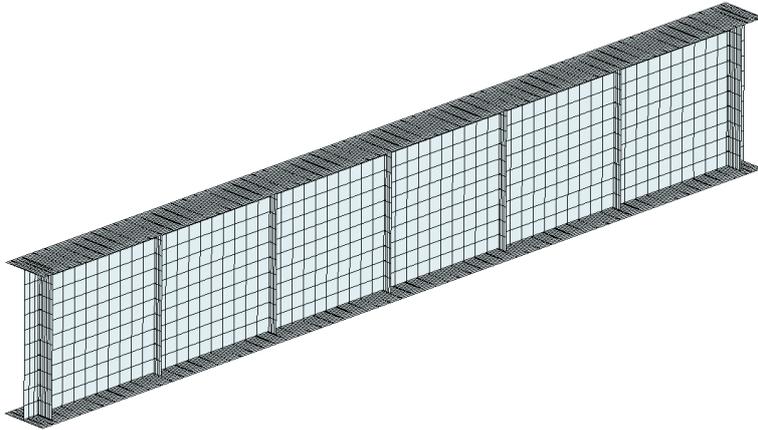
表 5.1 解析モデルと耐荷力

解析モデル	詳細	$V_u/V_Y$	各解析モデル 解析モデル O
A	中間垂直補剛材の断面寸法が端補剛材の断面寸法と同じ。中間垂直補剛材の上下端が上下フランジに連結されている [図 5.1 (a) 参照]。	0.931	1.0
B	中間垂直補剛材の断面寸法が道路橋示方書の規定に従ったもの。中間垂直補剛材の上下端が上下フランジに連結されている [図 5.1 (b) 参照]。	0.920	0.988
C	中間垂直補剛材の断面寸法が道路橋支方書の規定に従ったもの。中間垂直補剛材の上端は上フランジに連結されているが、下端は下フランジの中央面から 40mm 切り離されている [図 5.1 (c) 参照]。	0.916	0.984
O	両支点上の端補剛材と上下フランジとで囲まれたウェブの縦横比 $a_f/b_w$ が 1.0 で、端補剛材だけをもつ桁 [図 3.3 (a) 参照]。	0.931	

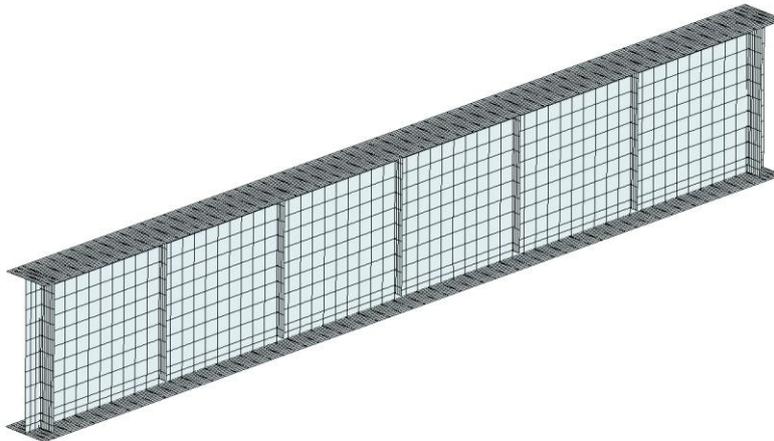
注記 :  $a/b_w=1.0$ ,  $R=1.0$  ( $F=1$ ),  $A_w/A_f=1.0$



(a) 解析モデル A



(b) 解析モデル B



(c) 解析モデル C

図 5.1 解析モデル

中間垂直補剛材を有する桁のせん断耐荷力は、次式で定義される幅厚比パラメータ  $R$  を式(4.2)に用いることによって与えられると仮定する。

$$R = \frac{1}{\pi} F \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\tau_{0.2}}{E}} \frac{b_w}{t_w} \quad (5.1)$$

$$k = \begin{cases} 4 + \frac{5.34}{(a/b_w)^2} & (0 < a/b_w \leq 1) \\ 5.34 + \frac{4}{(a/b_w)^2} & (1 < a/b_w) \end{cases} \quad (5.2)$$

ここに、 $F$  : 係数  
 $a$  : 隣接する中間垂直補剛材の間隔  
 $b_w$  : ウェブの高さ  
 $t_w$  : ウェブの板厚

表 5.1 の解析モデル A, B, C の桁の断面寸法は、 $a/b_w=1.0$  で、 $R=1.0$  に対するものである。ここで、式(5.1)の  $F$  の値を 1 としている。

解析モデル B と C の中間垂直補剛材は、道路橋示方書<sup>19)</sup>で規定される次式において等号が成立する場合のものである。

$$I_v \geq \frac{b_w t_w^3}{11} \gamma_{v.req} \quad (5.3)$$

$$\gamma_{v.req} = 8.0 \left( \frac{b_w}{a} \right)^2 \quad (5.4)$$

ここに、 $I_v$  : 中間垂直補剛材の断面二次モーメント

$\gamma_{v.req}$  : 必要剛比

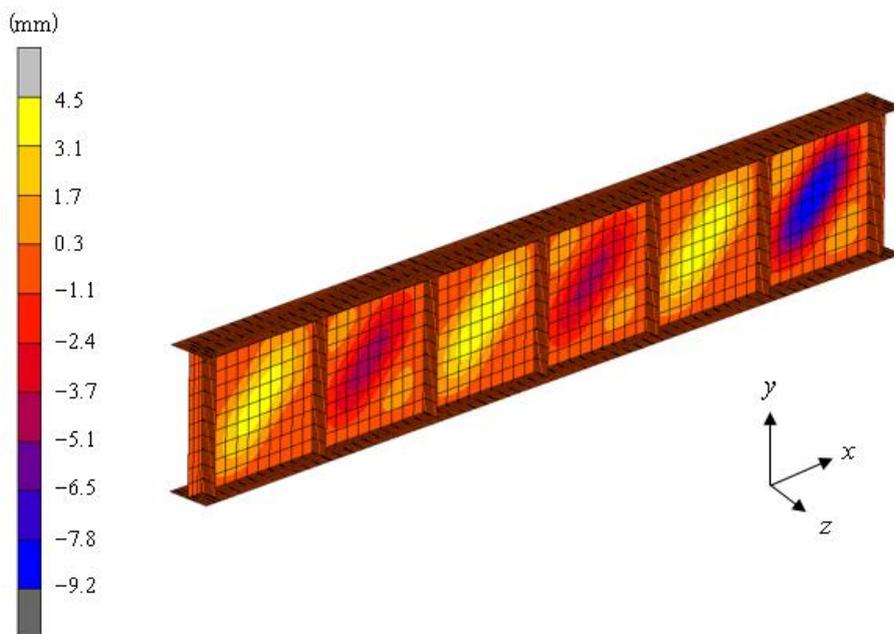
さらに、中間垂直補剛材に局部座屈が生じないようにするために、中間垂直補剛材の幅厚比を 5.82 とする (表 2.1 参照)。したがって、解析モデル B と C の中間垂直補剛材の板幅  $b_v$  と板厚  $t_v$  をそれぞれ 51.3mm と 8.8mm とする。

道路橋示方書<sup>19)</sup>においては、中間垂直補剛材は下フランジに適切な間隔を開けて取り付けることが規定されている。したがって、解析モデル C では、中間垂直補剛材の下端が下フランジの中央面から 40mm 切り離されている。

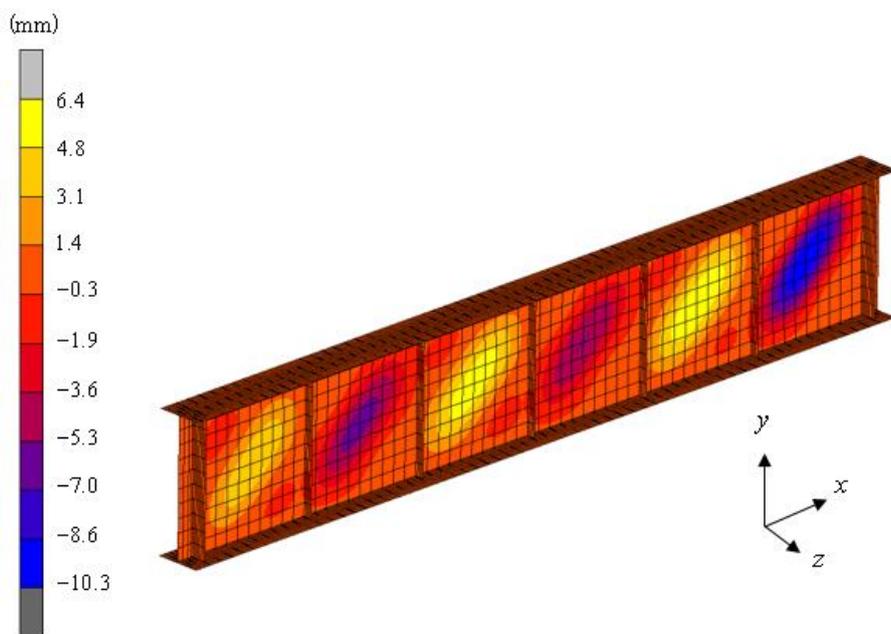
$R=1.0$  の解析モデル A, B, C の  $V_u/V_Y$  の値、および解析モデル O の  $V_u/V_Y$  に対する各解析モデルの  $V_u/V_Y$  の比を表 5.1 に示す。解析モデル A と O のせん断耐荷力は同じである。解析モデル B の中間垂直補剛材の断面寸法は解析モデル A のそれより小さくなるので、解析モデル B のせん断耐荷力は解析モデル A のそれよりわずかに低下する。解析モデル C の中間垂直補剛材の下端は下フランジから 40mm 切り離されているので、解析モデル C のせん

断耐荷力は解析モデル B のそれよりわずかに低下する。しかし、解析モデル O に対する解析モデル C のせん断耐荷力の低下率は 1.6% である。

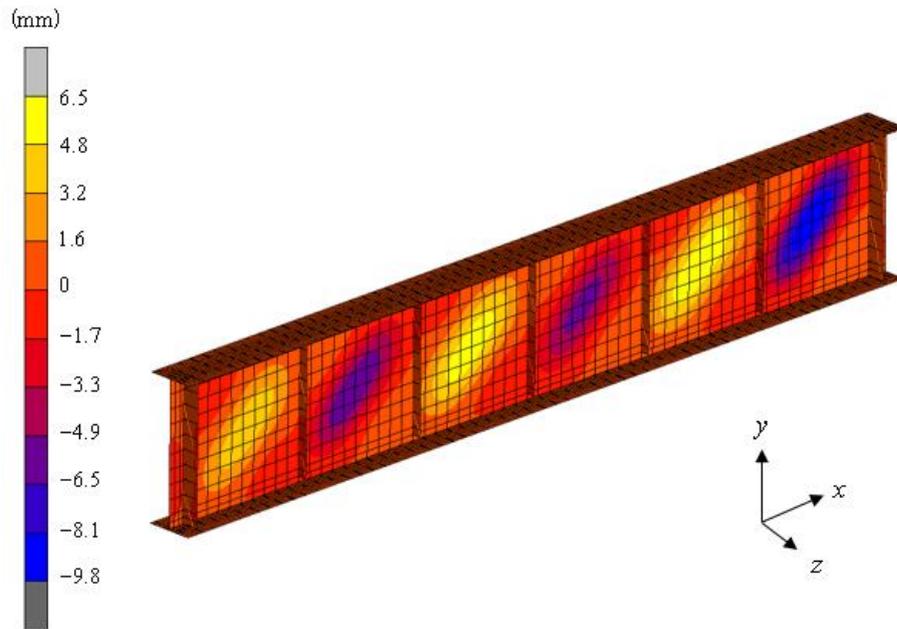
各モデルの終局時の変形を図 5.2 に示す。いずれの解析モデルにおいても中間垂直補剛材は崩壊していない。



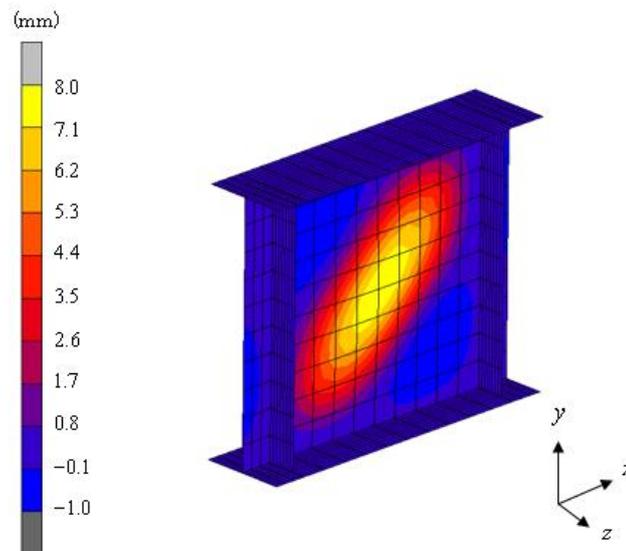
(a) 解析モデル A



(b) 解析モデル B



(c) 解析モデル C



(d) 解析モデル O

図 5.2 終局時の変形

断面積比  $A_w/A_f$  が耐荷力に及ぼす影響を表 5.2 に示す。解析モデルは C と O であり、 $a/b_w=1.0$ ,  $R=1.0$  ( $F$  の値を 1 としている) である。解析モデル O に対する解析モデル C のせん断耐荷力の低下率は、最大で 1.6% である。

表 5.2 断面積比が耐荷力に及ぼす影響

$A_w/A_f$	$V_u/V_Y$		$\frac{\text{解析モデルC}}{\text{解析モデルO}}$
	解析モデル C	解析モデル O	
1.0	0.916	0.931	0.984
2.0	0.908	0.914	0.993
3.0	0.902	0.910	0.991
4.0	0.889	0.894	0.994

注記 :  $a/b_w=1.0$ ,  $R=1.0$  ( $F=1$ )

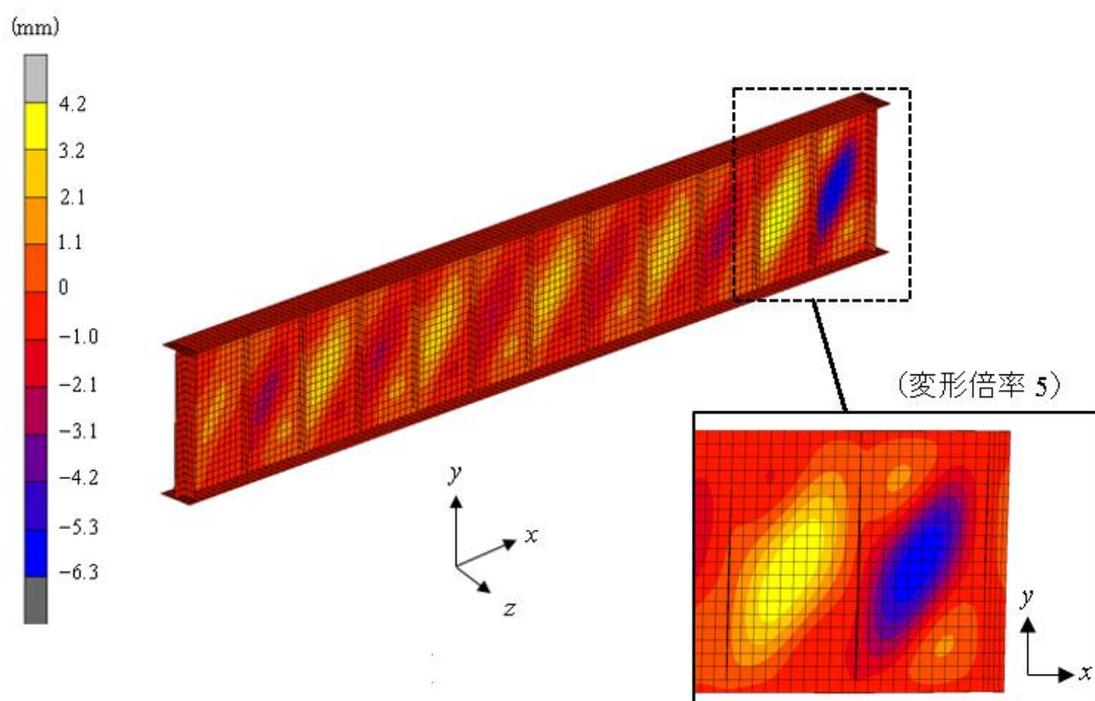
縦横比  $a/b_w$  が耐荷力に及ぼす影響を表 5.3 に示す。解析モデルは C と O であり、 $R=1.0$  ( $F$  の値を 1 としている)、 $A_w/A_f=1.0$  である。解析モデル O に対する解析モデル C のせん断耐荷力の低下率は、 $a/b_w=1.0$ , 1.5, 2.0 の場合、1.6% 未満であるが、 $a/b_w=0.5$  の場合、3.9% である。

$a/b_w=0.5$  の解析モデル C と O の終局時の変形を図 5.3 に示す。解析モデル C の中間垂直補剛材は解析モデル O の端補剛材と比較して、ウェブの面外変形によって起こされるねじれが大きい。したがって、他の縦横比と比較して、 $a/b_w=0.5$  のせん断耐荷力の低下率が大きくなったと考えられる。

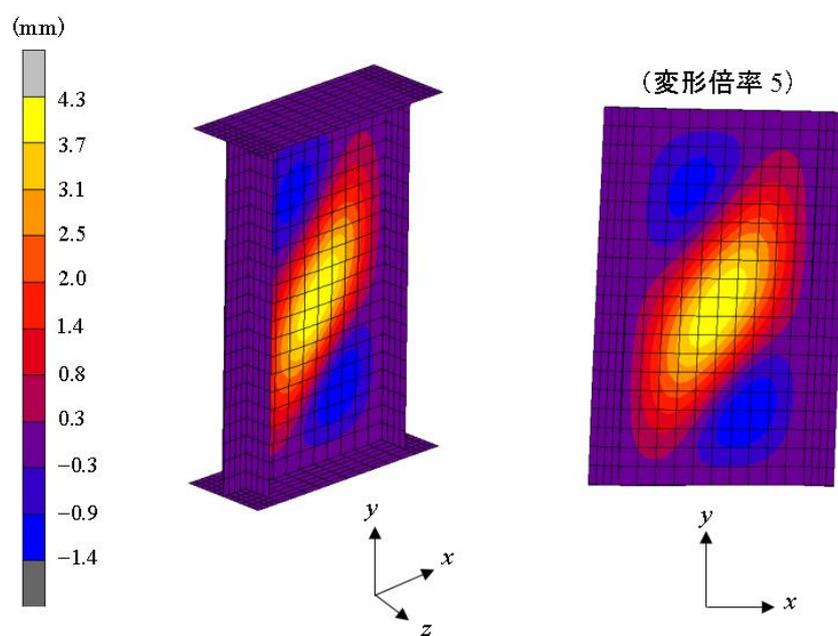
表 5.3 縦横比が耐荷力に及ぼす影響

$a/b_w$	$V_u/V_Y$		$\frac{\text{解析モデルC}}{\text{解析モデルO}}$
	解析モデル C	解析モデル O	
0.5	0.932	0.969	0.961
1.0	0.916	0.931	0.984
1.5	0.933	0.940	0.993
2.0	0.964	0.972	0.992

注記 :  $A_w/A_f=1.0$ ,  $R=1.0$  ( $F=1$ )



(a) 解析モデル C



(b) 解析モデル 0

図 5.3 終局時の変形 ( $a/b_w=0.5$ )

## 5.2 中間垂直補剛桁のせん断耐力の推定式

前節で示したように，解析モデル O に対する解析モデル C の耐力の低下率は最大で 3.9%であった．表 4.5 に示すように，無補剛桁の耐力の解析値は，係数  $F_L$  を用いて推定される耐力の値より，4%～9%ほど大きい．したがって，解析モデル C の耐力の解析値は，無補剛桁で与えられた  $F_L$  を式(5.1)の  $F$  に適用して推定される耐力の値より，依然として大きいことが予想される．そこで，式(5.1)の  $F$  に対して次式を与える．

$$F = 0.0085 \frac{A_w}{A_f} \frac{a}{b_w} + 0.75 \quad (5.5)$$

$a/b_w=1.0$  で  $A_w/A_f=1.0$  の解析モデル C に対して， $V_u/V_Y$  と  $R$  の関係を図 5.4 に示す．数値データを付録 I に示す．解析値は，式(5.5)が式(5.1)に使用された  $R$  によってプロットされている．解析値は耐力曲線の近傍に分布している．

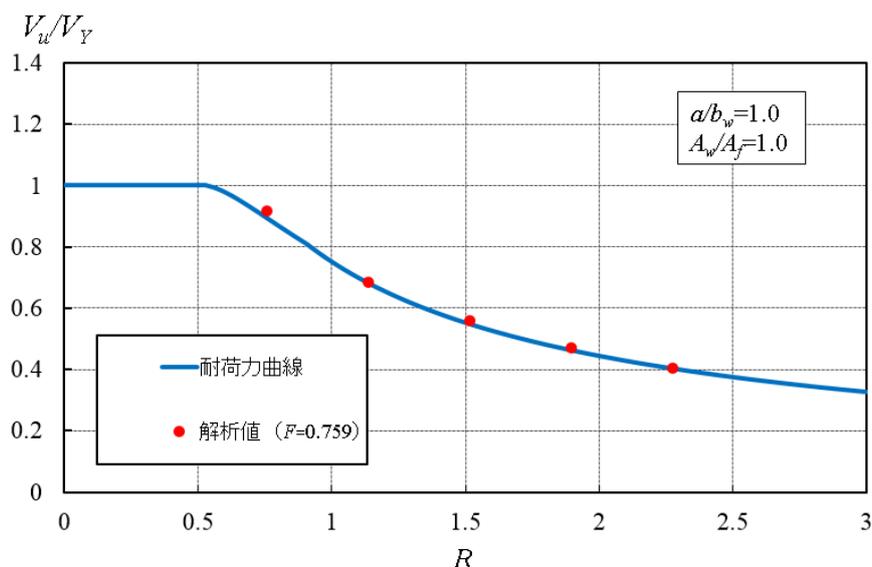


図 5.4  $V_u/V_Y$  と  $R$  の関係 (解析モデル C)

表 5.2 の解析モデル C に対する  $V_u/V_Y$  の解析値と式(5.5)の  $F$  が使用された式(4.2)によって推定される耐力の値の比較を表 5.4 に示す．さらに，表 5.3 の解析モデル C に対する  $V_u/V_Y$  の解析値と式(5.5)の  $F$  が使用された式(4.2)によって推定される耐力の値の比較を表 5.5 に示す．ここで， $a/b_w=0.5$  に対して式(5.5)が適用できると仮定している．表 5.4 では，耐力の解析値は，係数  $F$  を用いて推定される耐力の値より，2%～3%ほど大きい．表 5.5 では，耐力の解析値は，係数  $F$  を用いて推定される耐力の値より，3%～9%ほど大きい．

表 5.4 断面積比が耐荷力に及ぼす影響（解析モデル C）

$A_w/A_f$	$F$	$R$	$V_u/V_Y$		解析値 推定値
			解析値	推定値	
1.0	0.759	0.759	0.916	0.892	1.03
2.0	0.767	0.767	0.908	0.886	1.02
3.0	0.776	0.776	0.902	0.880	1.03
4.0	0.784	0.784	0.889	0.875	1.02

注記： $a/b_w=1.0$

表 5.5 縦横比が耐荷力に及ぼす影響（解析モデル C）

$a/b_w$	$F$	$R$	$V_u/V_Y$		解析値 推定値
			解析値	推定値	
0.5	0.754	0.754	0.932	0.895	1.04
1.0	0.759	0.759	0.916	0.893	1.03
1.5	0.763	0.763	0.933	0.890	1.05
2.0	0.767	0.767	0.964	0.888	1.09

注記： $A_w/A_f=1.0$

## 第 6 章 結論

本研究では、有限要素法による弾塑性有限変位解析によって、せん断を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力を明らかにした。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) 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。
- (3) 結論(2)を考慮して，4 辺単純支持された長方形板のせん断耐荷力の推定式の幅厚比パラメータ  $R$  に，せん断座屈係数  $k_L$  を調整する係数  $F_L$  を導入することにより，無補剛桁のせん断耐荷力の推定式として次式が与えられた。

$$\frac{V_u}{V_Y} = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ \frac{Q_1}{R} - \frac{Q_2}{R^2} & (R_1 \leq R \leq R_2) \\ 0.8 \left( \frac{R_2}{R} \right)^p & (R_2 \leq R \leq 3) \end{cases}$$

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

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

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

$$k_L = \begin{cases} 4 + \frac{5.34}{(a_L/b_w)^2} & (0 < a_L/b_w \leq 1) \\ 5.34 + \frac{4}{(a_L/b_w)^2} & (1 < a_L/b_w) \end{cases}$$

$$F_L = 0.0085 \frac{A_w a_L}{A_f b_w} + 0.75$$

- ここに、 $V_u$  : 桁のせん断耐荷力  
 $V_Y$  : ウェブ全体が降伏するときのせん断強度  
 $\tau_{0.2}$  : 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ウェブの幅厚比パラメータ  
 $R_1, R_2$  : ウェブの幅厚比パラメータの値  
 $Q_1, Q_2, p$  : 定数  
 $F_L$  : 係数  
 $k_L$  : せん断座屈係数  
 $\mu$  : ポアソン比 (=0.3)  
 $E$  : ヤング率 (=70GPa)  
 $a_L$  : 両支持点上の端補剛材の間隔  
 $b_w$  : ウェブの高さ  
 $t_w$  : ウェブの板厚

$\sigma_{0.2}, R_1, R_2, Q_1, Q_2, p$  の値を下表に示す。  $A_w/A_f$  と  $a_L/b_w$  の適用範囲は次の通りである。

$$1.0 \leq \frac{A_w}{A_f} \leq 4.0, \quad 0.5 \leq \frac{a_L}{b_w} \leq 6.5$$

表  $\sigma_{0.2}, R_1, R_2, Q_1, Q_2, p$  の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$R_1$	$R_2$	$Q_1$	$Q_2$	$p$
A6061-T6	245	0.60	1.09	1.2	0.36	0.81
A5083-O	125	0.53	0.92	1.02	0.26	0.76

係数  $F_L$  は、 $a_L/b_w$  が 1.0, 3.0, 6.5 の無補剛桁に対して得られた解析データに基づいて定式化された。今後、これらの値以外の縦横比に対してさらに解析を実施し、係数  $F_L$  の妥当性が明らかにされなければならない。

- (4) 道路橋示方書で規定される中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁のせん断耐荷力は, 次式で定義される幅厚比パラメータ  $R$  を結論(3)のせん断耐荷力の推定式に用いることによって与えられる.

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

$$k = \begin{cases} 4 + \frac{5.34}{(a/b_w)^2} & (0 < a/b_w \leq 1) \\ 5.34 + \frac{4}{(a/b_w)^2} & (1 < a/b_w) \end{cases}$$

$$F = 0.0085 \frac{A_w}{A_f} \frac{a}{b_w} + 0.75$$

ここに,  $F$  : 係数  
 $k$  : せん断座屈係数  
 $a$  : 隣接する中間垂直補剛材の間隔

$A_w/A_f$  と  $a/b_w$  の適用範囲は次の通りである.

$$1.0 \leq \frac{A_w}{A_f} \leq 4.0, \quad 0.5 \leq \frac{a}{b_w} \leq 2.0$$

今後, さらに, 面積比  $A_w/A_f$  と縦横比  $a/b_w$  の組合せに対して解析を実施し, 係数  $F$  の妥当性が明らかにされなければならない.

## 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) 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, 第 49 巻, 第 11 号, pp.46-51, 2015.
- 4) 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.
- 5) 土木学会, 鋼構造委員会, アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針作成検討小委員会: アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針 (案), 2015.
- 6) 大倉一郎, 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.
- 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) 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.
- 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.327-328, 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) JIS H 4000: アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条, 2014.
- 13) JIS H 4100: アルミニウム及びアルミニウム合金の押出形材, 2015.
- 14) MSC.Software Corporation: Marc Mentat 2013.0.0.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, pp.323-325, 2012.

付録 A 無補剛桁および端補剛材の断面寸法 [A6061-T6]

表 A.1  $a/b_w=1.0$

(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 A.2  $a/b_w=3.0$ (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 A.3  $a/b_w=6.5$

(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

付録 B 無補剛桁および端補剛材の断面寸法 [A5083-O]

表 B.1  $a/b_w=1.0$

(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	33.5

(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. 2  $a/b_w=3.0$ (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. 3  $a/b_w=6.5$

(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 中間垂直補剛材を有する桁および端補剛材の断面寸法

C.1 表 5.1 に示す解析モデル A, B, C, O

解析モデル	$b_w/t_w$	$t_w$ (mm)	$b_w$ (mm)	$t_f$ (mm)	$b_f$ (mm)	$t_s$ (mm)	$b_s$ (mm)	$t_v$ (mm)	$b_v$ (mm)
A	90.5	8.8	800.0	26.2	130.8	17.3	86.3	17.3	86.3
B	90.5	8.8	800.0	26.2	130.8	17.3	86.3	8.8	51.3
C	90.5	8.8	800.0	26.2	130.8	17.3	86.3	8.8	51.3
O	90.5	8.8	800.0	26.2	130.8	17.3	86.3		

C.2 表 5.2 に示す解析モデル C

$A_w/A_f$	$b_w/t_w$	$t_w$ (mm)	$b_w$ (mm)	$t_f$ (mm)	$b_f$ (mm)	$t_s$ (mm)	$b_s$ (mm)	$t_v$ (mm)	$b_v$ (mm)
1.0	90.5	8.8	800.0	26.2	130.8	17.3	86.3	8.8	51.3
2.0	135.7	5.9	800.0	21.4	107.1	12.3	61.4	8.8	51.3
3.0	181.0	4.4	800.0	18.6	92.9	9.7	48.6	8.8	51.3
4.0	226.2	3.5	800.0	16.6	83.2	8.1	40.7	8.8	51.3

C.3 表 5.3 に示す解析モデル C と O

解析モデル	$a/b_w$	$b_w/t_w$	$t_w$ (mm)	$b_w$ (mm)	$t_f$ (mm)	$b_f$ (mm)	$t_s$ (mm)	$b_s$ (mm)	$t_v$ (mm)	$b_v$ (mm)
C	0.5	149.1	5.4	800.0	20.5	102.3	13.7	68.5	8.6	50.3
	1.0	90.5	8.8	800.0	26.2	130.8	17.3	86.3	8.8	51.3
	1.5	79.0	10.1	800.0	28.0	139.8	18.4	92.0	9.8	56.9
	2.0	74.6	10.7	800.0	28.8	143.8	18.9	94.6	10.2	59.4
O	0.5	149.1	5.4	800.0	20.5	102.3	13.7	68.5		
	1.0	90.5	8.8	800.0	26.2	130.8	17.3	86.3		
	1.5	79.0	10.1	800.0	28.0	139.8	18.4	92.0		
	2.0	74.6	10.7	800.0	28.8	143.8	18.9	94.6		

C.4 図 5.4 に示す解析モデル C

$R$	$b_w/t_w$	$t_w$ (mm)	$b_w$ (mm)	$t_f$ (mm)	$b_f$ (mm)	$t_s$ (mm)	$b_s$ (mm)	$t_v$ (mm)	$b_v$ (mm)
1.0	90.5	8.8	800.0	26.2	130.8	17.3	86.3	8.8	51.3
1.5	135.7	5.9	800.0	21.4	107.1	12.3	61.4	6.5	38.0
2.0	181.0	4.4	800.0	18.6	92.9	9.7	48.6	5.2	30.5
2.5	226.2	3.5	800.0	16.6	83.2	8.1	40.7	4.4	25.7
3.0	271.5	2.9	800.0	15.2	76.0	7.1	33.5	3.8	22.3

付録 D FEM 解析の数値データ [図 3.6]

表 D.1 A6061-T6

R	$V_u/V_Y$	
	鉛直方向載荷	水平方向載荷
0.6	1.081	1.097
1.0	0.970	0.987
1.5	0.745	0.766
2.0	0.611	0.629
2.5	0.522	0.535
3.0	0.456	0.461

表 D.2 A5083-O

R	$V_u/V_Y$	
	鉛直方向載荷	水平方向載荷
0.6	1.066	1.078
1.0	0.913	0.931
1.5	0.685	0.695
2.0	0.559	0.566
2.5	0.476	0.480
3.0	0.424	0.428

## 付録 E Δ<sup>2</sup>法によるせん断座屈応力の推定

Δ<sup>2</sup>法は、せん断応力  $\tau$  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<sup>16)</sup>。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、 $\tau_{cr}$  : 直線の切片 (せん断座屈応力)

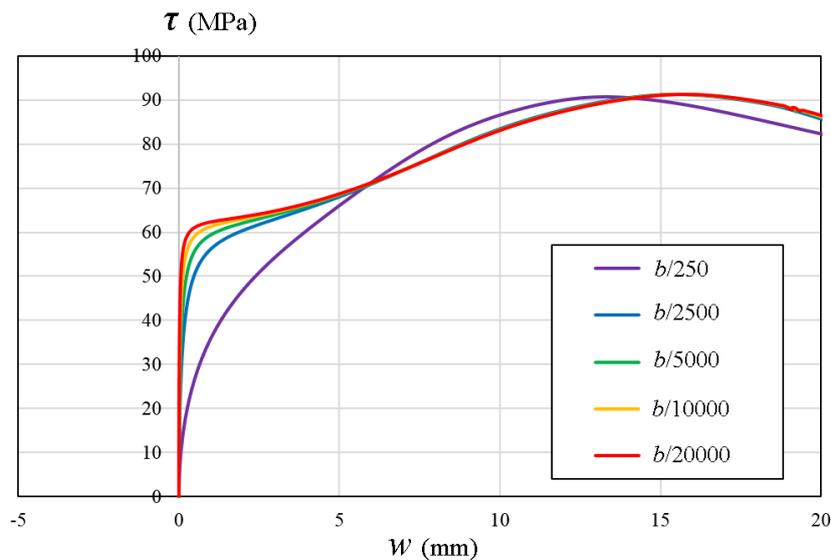
$c$  : 直線の傾き

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<sup>2</sup>法を適用する。面内方向の境界条件は表 4.1 と同じである。式(3.2)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。

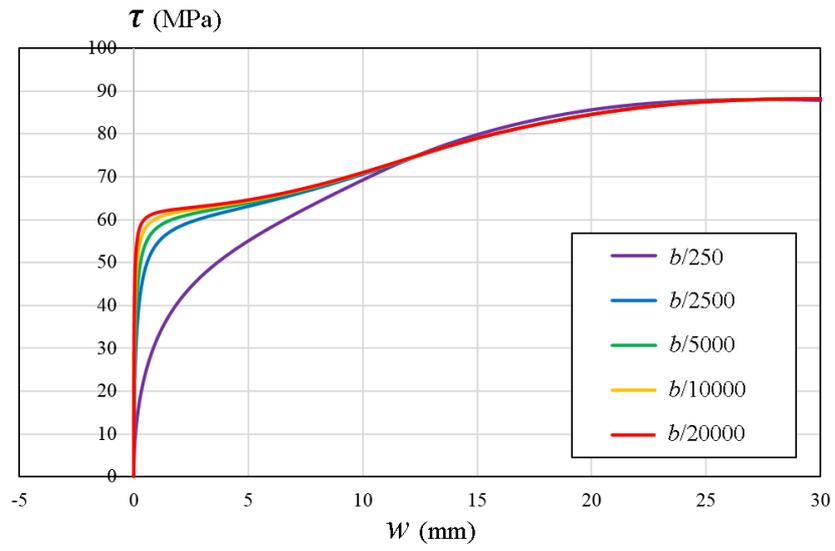
表 E.1 長方形板の寸法

$a/b$	$R$	$\mu$	$E$ (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

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

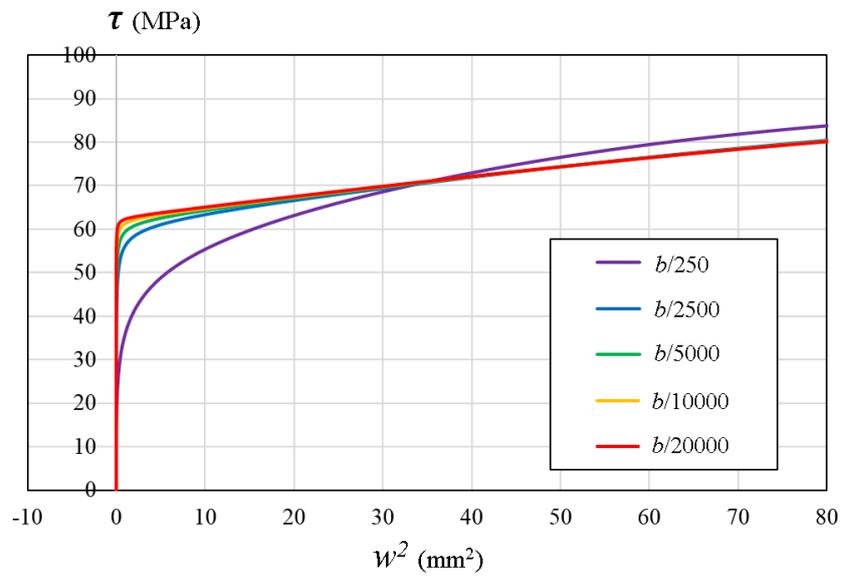


(a)  $a/b=1.0$

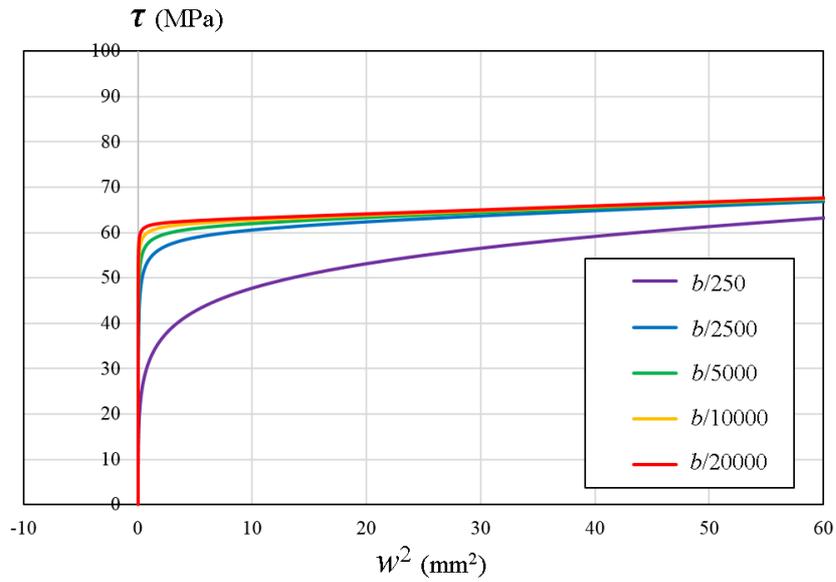


(b)  $a/b=6.5$

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  $\tau_{cr}$  を表 E.2 に示す. 同表には, 式(4.6)で与えられる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,  $\Delta^2$  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,  $\Delta^2$  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  $\Delta^2$  法によって推定されるせん断座屈応力

$a/b$	$\tau_{cr}$ (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

## 付録F 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 6)と同じである。縦横比  $a/b=6.5$  の長方形板に対して、式(4.2)が与える耐荷力曲線 ( $F_L=1.0$ ) と解析値の比較を図 F.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 F.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、 $F_L$  を 1.0 とした式(4.2)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。

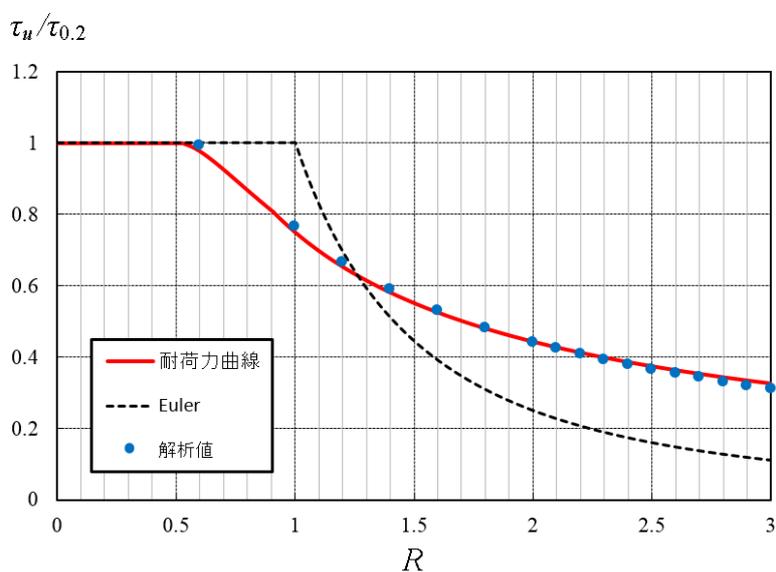


図 F.1  $\tau/\tau_{0.2}$  と  $R$  の関係

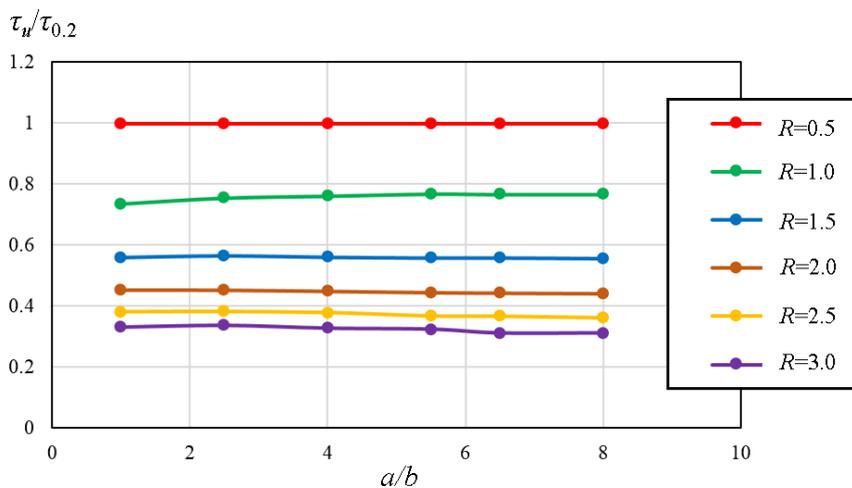


図 F.2  $\tau/\tau_{0.2}$  と  $a/b$  の関係

## 付録 G 縦横比が 1 未満の長方形板のせん断耐力

縦横比  $a/b=0.5$  の長方形板に対して、式(4.2)が与える耐力曲線 ( $F_L=1.0$ ) と解析値の比較を図 G. 1 に示す。アルミニウム合金は A5083-O であり、解析条件は文献 6) と同じである。解析値は耐力曲線の直上にある。せん断耐力と縦横比の関係を図 G. 2 に示す。各縦横比に対して、せん断耐力はほとんど変化しない。したがって、 $F_L$  を 1.0 とした式(4.2)は、縦横比が 1 未満の長方形板に対しても適用できる。

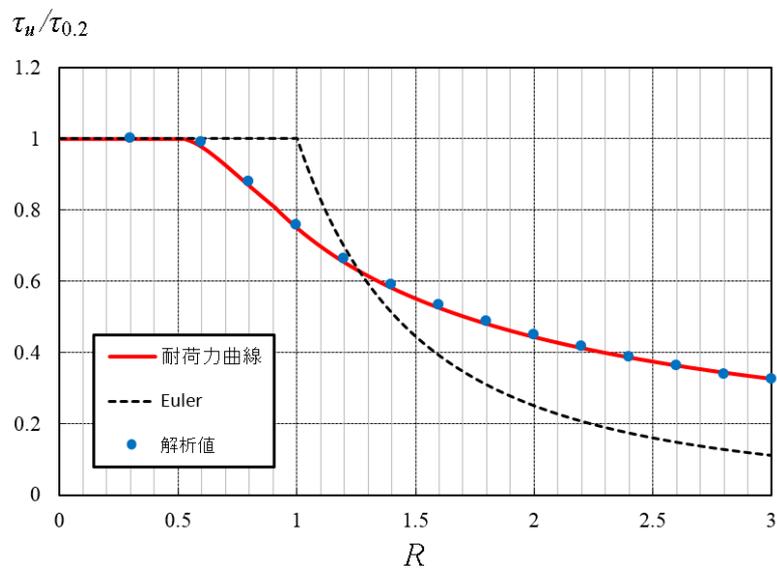


図 G. 1  $\tau/\tau_{0.2}$  と  $R$  の関係

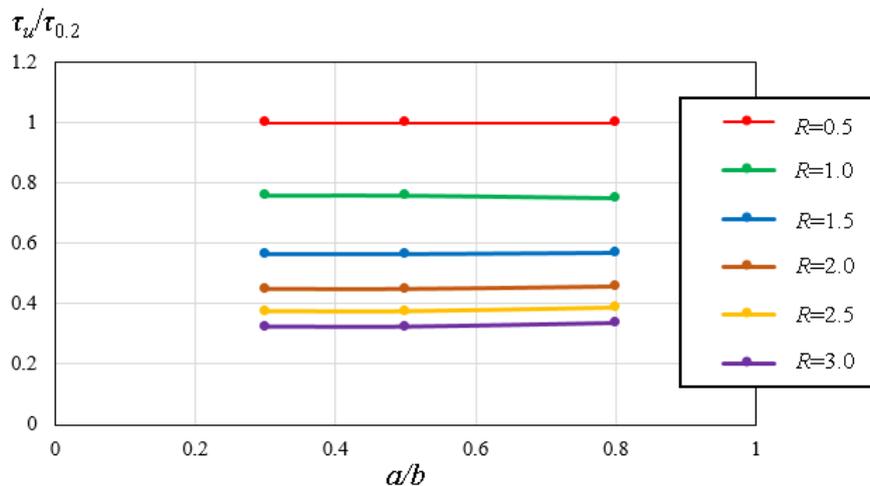


図 G. 2  $\tau/\tau_{0.2}$  と  $a/b$  の関係

付録 H FEM 解析の数値データ [図 4.5 と 4.6]

表 H.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	1.210	1.096	1.062	1.048
0.6	1.097	1.042	1.027	1.022
1.0	0.987	0.970	0.958	0.951
1.5	0.766	0.753	0.751	0.746
2.0	0.629	0.616	0.609	0.605
2.5	0.535	0.519	0.517	0.513
3.0	0.461	0.447	0.442	0.439

(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	1.119	1.066	1.048	1.039
0.6	1.055	1.035	1.028	1.023
1.0	1.003	0.965	0.935	0.913
1.5	0.771	0.743	0.721	0.703
2.0	0.612	0.593	0.581	0.571
2.5	0.502	0.495	0.488	0.478
3.0	0.441	0.425	0.420	0.411

(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	1.090	1.055	1.041	1.040
0.6	1.050	1.035	1.030	1.016
1.0	0.999	0.963	0.927	0.902
1.5	0.771	0.729	0.688	0.676
2.0	0.603	0.569	0.540	0.519
2.5	0.511	0.467	0.436	0.430
3.0	0.426	0.392	0.374	0.363

表 H. 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	1.177	1.082	1.054	1.041
0.6	1.078	1.034	1.023	1.019
1.0	0.931	0.914	0.910	0.894
1.5	0.703	0.682	0.676	0.672
2.0	0.571	0.553	0.548	0.545
2.5	0.482	0.468	0.463	0.460
3.0	0.420	0.407	0.402	0.399

(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	1.105	1.056	1.040	1.032
0.6	1.048	1.032	1.025	1.020
1.0	0.959	0.924	0.888	0.858
1.5	0.694	0.675	0.658	0.644
2.0	0.551	0.536	0.526	0.518
2.5	0.467	0.452	0.444	0.439
3.0	0.404	0.391	0.382	0.378

(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	1.078	1.048	1.038	1.032
0.6	1.047	1.032	1.025	1.020
1.0	0.964	0.931	0.885	0.850
1.5	0.691	0.673	0.640	0.615
2.0	0.547	0.530	0.505	0.485
2.5	0.450	0.436	0.414	0.398
3.0	0.394	0.377	0.357	0.343

付録 I FEM 解析の数値データ (図 5.4)

表 I.1 解析モデル C の解析値 ( $a/b_w=1.0$ ,  $A_w/A_f=1.0$ )

$R$	$V_u/V_Y$
1.0	0.916
1.5	0.685
2.0	0.558
2.5	0.472
3.0	0.403