

面内曲げを受ける  
縦補剛されたアルミニウム合金板の最適断面形状  
と耐荷力

ALST 研究レポート 52

2018 年 7 月

大阪大学大学院工学研究科

清水弘樹，大倉一郎

## 概要

面内曲げを受ける，縦補剛されたアルミニウム合金板の座屈強度を最大にする断面形状，すなわち座屈強度に関する最適断面形状を明らかにする．次に，この最適断面形状を有する，縦補剛されたアルミニウム合金板の耐荷力を，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する．考慮するアルミニウム合金は，熱処理アルミニウム合金 A6061-T6 である．

## 目次

第1章 序論	・・・1
第2章 縦補剛された長方形板の最適断面形状	・・・3
2.1 縦補剛材と長方形板の板厚比	・・・3
2.2 縦補剛された長方形板の幅厚比の適用範囲	・・・6
2.3 縦補剛材の幅厚比	・・・7
2.4 縦補剛材と長方形板の板厚比と長方形板の幅厚比の関係	・・・8
2.5 最適断面形状	・・・10
2.6 考慮するパネル数	・・・17
2.7 片側補剛と両側補剛	・・・18
第3章 FEMによる弾塑性有限変位解析	・・・20
3.1 解析対象	・・・20
3.2 接合による強度低下と残留応力	・・・21
3.3 初期たわみ	・・・22
3.4 応力-ひずみ関係	・・・27
3.5 境界条件	・・・27
第4章 最適断面形状を有する縦補剛された長方形板の耐荷力	・・・30
4.1 初期たわみ形状が耐荷力に及ぼす影響	・・・30
4.2 最適断面形状に対する耐荷力	・・・31
4.3 耐荷力と長方形板の幅厚比の関係	・・・35
第5章 結論	・・・42
参考文献	・・・45
付録A 図2.6, 2.7, 2.8の数値データ	・・・47
付録B 圧縮と曲げを受ける長方形板の座屈係数	・・・52
付録C 表4.1の解析対象の寸法	・・・54
付録D 図4.1の数値データ	・・・55
付録E 図4.3の数値データ	・・・59

## 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、2003年に拡幅歩行者用アルミニウム床版が建設された<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>、2015年には津波対策用緊急仮設橋の床版にアルミニウム床版が採用された<sup>3)</sup>。このような状況で、道路橋用アルミニウム床版だけでなく、それを支持する桁にもアルミニウム合金材を適用することが期待される。

図1.1に示すように、アルミニウム歩道橋の桁の製作方法は、鋼桁のそれと同じで、アルミニウム合金A5083-Oの圧延板をMIG溶接による隅肉溶接で連結することにより製作される。道路橋は歩道橋より規模が大きく、作用する荷重も格段に大きくなるので、0.2%耐力が125MPaのA5083-Oを用いて道路橋の桁を設計することは困難である。したがって、道路橋の桁の設計には、0.2%耐力が245MPaのA6061-T6の使用が必須である。しかし、アルミニウム合金A6061-T6は熱処理によって0.2%耐力が高められているので、MIG溶接を施すと、溶接部の0.2%耐力が約半分まで低下する。図1.1に示す桁をA6061-T6で製作すると、垂直補剛材をウェブに連結する隅肉溶接の位置で強度が低下するので、桁全体としての強度も低下する。そこで、アルミニウム合金A6061-T6を活かす桁構造として、図1.2に示す、押出型材を摩擦攪拌接合によって突合せ接合し、等間隔に縦補剛されたウェブを有するアルミニウム合金桁が提案された<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。ここで、押出型材と摩擦攪拌接合を用いると、任意の断面形状を製作することが可能となるので、縦補剛されたウェブの断面形状の決め方が求められている。

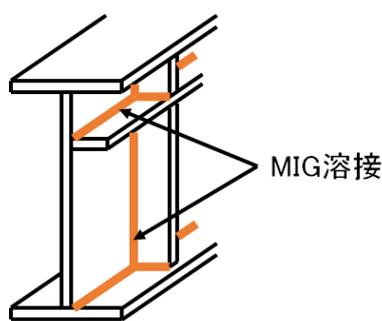


図 1.1 従来のアルミニウム合金桁

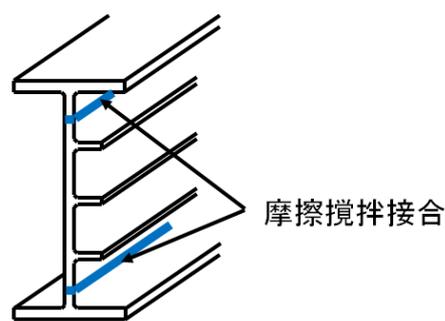


図 1.2 縦補剛されたウェブを有するアルミニウム合金桁

これまでに、面内曲げを受ける長方形板の耐荷力が調べられ<sup>5)</sup>、得られた耐荷力をウェブの耐荷力に適用することにより、曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力の推定式が与えられた<sup>6)</sup>。同様に、面内せん断を受ける長方形板の耐荷力が調べられ<sup>7)</sup>、得られた耐荷力を

ウェブの耐荷力に適用することにより，せん断を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力の推定式が与えられた<sup>8)</sup>。

前述したように，面内曲げを受ける長方形板の耐荷力をウェブに適用することにより，アルミニウム合金桁の曲げ耐荷力の推定式が与えられたので，**図1.2**に示す，縦補剛されたウェブを有するアルミニウム合金桁の曲げ耐荷力の推定式も，面内曲げを受ける，縦補剛された長方形板の耐荷力をウェブに適用することによって与えられるであろう。

以上の研究背景から，本研究は，面内曲げを受ける，縦補剛されたアルミニウム合金板の座屈強度を最大にする断面形状，すなわち座屈強度に関する最適断面形状を明らかにする。次に，この最適断面形状を有する，縦補剛されたアルミニウム合金板の耐荷力を，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する。考慮するアルミニウム合金は，熱処理アルミニウム合金A6061-T6である。

## 第 2 章 縦補剛された長方形板の最適断面形状

### 2.1 縦補剛材と長方形板の板厚比

縦補剛された長方形板は、押出型材を摩擦攪拌接合することによって製作される。押出型材はダイスの寸法制限を受けるため、図 2.1 に示す、縦補剛材の板幅  $b_r$  が大きい押出型材の製造は困難である。縦補剛材の幅が小さい場合、縦補剛材は長方形板と一体となって座屈する。この場合、面内曲げを受ける、縦補剛された長方形板の幅厚比パラメータ  $R$  は次式で与えられる。

$$R = \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{cr}}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)\sigma_{0.2}b}{kEt}} \quad (2.1)$$

この式の記号の説明は、図 2.1 を参照して、次の通りである。

- $R$  : 面内曲げを受ける、縦補剛された長方形板の幅厚比パラメータ
- $\sigma_{0.2}$  : アルミニウム合金の 0.2% 耐力
- $\sigma_{cr}$  : 面内曲げを受ける、縦補剛された長方形板の座屈強度
- $k$  : 面内曲げを受ける、縦補剛された長方形板の座屈係数
- $\mu$  : ポアソン比 (=0.3)
- $E$  : ヤング率 (=70GPa)
- $b$  : 長方形板の板幅
- $t$  : 長方形板の板厚

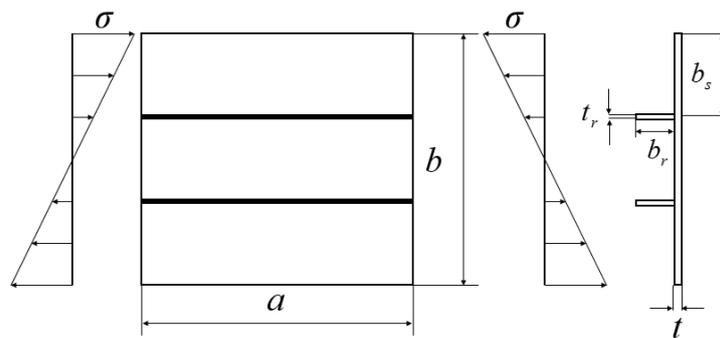


図 2.1 面内曲げを受ける、縦補剛された長方形板

面内曲げを受ける、縦補剛された長方形板の座屈係数は次式で与えられる<sup>9)</sup>。

$$k = 10.62 \frac{1 + 1.25\sqrt{1 + c_1 s \gamma}}{1 + c_2 s \delta} \quad (2.2)$$

$$\text{ここに, } \gamma = \frac{EI_r}{Db} \quad (2.3)$$

$$\delta = \frac{A_r}{bt} \quad (2.4)$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \quad (2.5)$$

- $s$  : 隣接する縦補剛材で区切られた板要素の総数 ( $=b/b_s$ )  
 $b_s$  : 隣接する縦補剛材で区切られた板要素の幅  
 $\gamma$  : 板の曲げ剛性に対する, 一つの縦補剛材の曲げ剛性の比  
 $\delta$  : 板の断面積に対する, 一つの縦補剛材の断面積比  
 $I_r$  : 一つの縦補剛材の断面二次モーメント  
 $A_r$  : 一つの縦補剛材の断面積  
 $D$  : 長方形板の板曲げ剛性  
 $c_1, c_2$  : 係数 (表 2.1 に示す値)

表 2. 1  $c_1, c_2$  の値

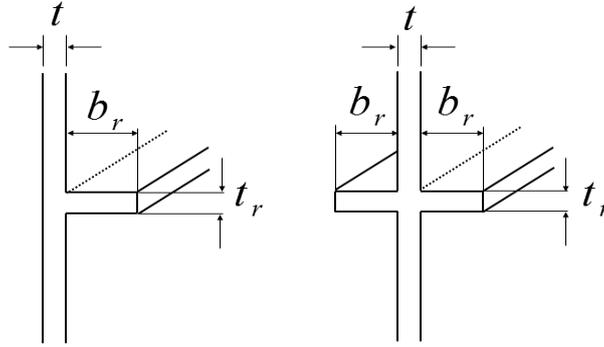
$s$	$c_1$	$c_2$
2	0.7	0
3	1	0.92
4 以上	1	1

図 2.2 を参照して, 一つの縦補剛材の断面二次モーメント  $I_r$  と断面積  $A_r$  はそれぞれ次式で与えられる.

$$I_r = \frac{jb_r^3 t_r}{3} \quad (2.6)$$

$$A_r = jb_r t_r \quad (2.7)$$

- ここに,  $j$  : 縦補剛材が片側の場合 1, 両側の場合 2  
 $b_r$  : 片側の縦補剛材の板幅  
 $t_r$  : 縦補剛材の板厚



(a) 片側補剛 ( $j=1$ )      (b) 両側補剛 ( $j=2$ )

図 2.2 片側補剛と両側補剛

式(2.5)と(2.6)を式(2.3), 式(2.7)を式(2.4)に代入して, それぞれ次式を得る.

$$\gamma = \frac{4j(1-\mu^2)\beta_r^3(t_r/t)^4}{b/t} \quad (2.8)$$

$$\delta = \frac{j\beta_r(t_r/t)^2}{b/t} \quad (2.9)$$

ここに,  $b/t$  : 縦補剛された長方形板の幅厚比

$\beta_r$  : 縦補剛材の幅厚比 ( $=b_r/t_r$ )

$t_r/t$  : 縦補剛材と長方形板の板厚比

式(2.8)と(2.9)を式(2.2)に代入して次式を得る.

$$k = 10.62 \frac{1 + 1.25 \sqrt{1 + \frac{4c_1js(1-\mu^2)\beta_r^3(t_r/t)^4}{b/t}}}{1 + \frac{c_2js\beta_r(t_r/t)^2}{b/t}} \quad (2.10)$$

さらに, 式(2.10)で与えられる, 面内曲げを受ける, 縦補剛された長方形板の座屈係数を式(2.1)の座屈係数  $k$  に用いて次式を得る.

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2) \frac{\sigma_{0.2} b}{E t}}{1 + 1.25 \sqrt{1 + \frac{4c_1js(1-\mu^2)\beta_r^3(t_r/t)^4}{b/t}}}} \sqrt{\frac{10.62}{1 + \frac{c_2js\beta_r(t_r/t)^2}{b/t}}} \quad (2.11)$$

式(2.11)を  $t_r/t$  について整理して, 次式を得る.

$$(H_1 - H_2^2 H_3) \left(\frac{t_r}{t}\right)^4 + 2H_2 H_3 (H_3 - 0.8) \left(\frac{t_r}{t}\right)^2 + \{1 - (H_3 - 0.8)^2\} = 0 \quad (2.12)$$

$$\text{ここに, } H_1 = \frac{4(1-\mu^2)c_1js\beta_r^3}{b/t}$$

$$H_2 = \frac{c_2js\beta_r}{b/t}$$

$$H_3 = \frac{0.9}{\pi^2} \frac{1-\mu^2}{R^2} \frac{\sigma_{0.2}}{E} \left(\frac{b}{t}\right)^2$$

この式より,  $t_r/t$  と  $b/t$  の関係が次のように与えられる.

$$\frac{t_r}{t} = \sqrt{\frac{H_2H_3(H_3 - 0.8) + \sqrt{H_2^2H_3^2 - H_1\{1 - (H_3 - 0.8)^2\}}}{H_1 - H_3^2H_3^2}} \quad (2.13)$$

$t_r/t$  と  $b/t$  の関係を後の 2.4 節に示す.

## 2.2 縦補剛された長方形板の幅厚比の適用範囲

縦補剛材が長方形板と一体となって座屈（全体座屈）する場合に対する座屈強度は, 縦補剛材が節となり, 隣接する縦補剛材間の板要素が座屈（局部座屈）する場合の座屈強度を超えることはない. 圧縮と曲げを受ける, 最上段の縦補剛材で区切られた板要素を図2.3に示す.

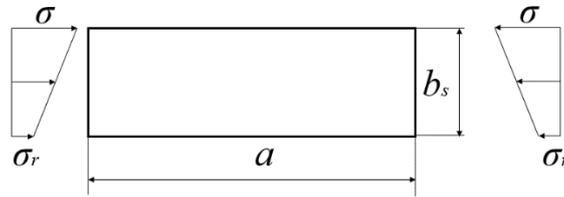


図2.3 最上段の $a \times b_s$ の板要素

$a \times b$ の縦補剛された長方形板が面内曲げ応力 $\sigma$ を受けるとき, 最上段の縦補剛材で区切られた $a \times b_s$ の板要素の下縁に生じる応力 $\sigma_r$ は次式で与えられる.

$$\sigma_r = \left(1 - \frac{2}{s}\right)\sigma \quad (2.14)$$

したがって,  $a \times b_s$ の板要素の上下縁の応力比 $\varphi_s$ は次式で与えられる.

$$\varphi_s = \frac{\sigma - \sigma_r}{\sigma} = \frac{2}{s} \quad (2.15)$$

$a \times b_s$ の板要素が4辺単純支持されていると仮定すると, 圧縮と曲げを受ける,  $a \times b_s$ の板要素の座屈係数 $k_l$ は, 式(2.15)を用いて次式で与えられる<sup>10)</sup>.

$$k_l = \frac{8.4}{2.1 - \varphi_s} = \frac{8.4s}{2.1s - 2} \quad (2.16)$$

したがって、圧縮と曲げを受ける $a \times b_s$ の板要素の座屈強度 $\sigma_{lcr}$ は次式で表される。

$$\begin{aligned}\sigma_{lcr} &= k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \frac{1}{(b_s/t)^2} = \frac{8.4s^3}{2.1s-2} \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \frac{1}{(b/t)^2} \\ &= \frac{8.4s^3}{2.1s-2} \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \beta_1^2\end{aligned}\quad (2.17)$$

ここで、 $\beta_1$ は、縦補剛された長方形板が局部座屈を起こす幅厚比である。

他方、無補剛の長方形板の座屈強度 $\sigma_{0cr}$ は次式で与えられる。

$$\sigma_{0cr} = 23.9 \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \frac{1}{\beta_0^2}\quad (2.18)$$

ここで、 $\beta_0$ は、無補剛の長方形板の幅厚比である。

$\sigma_{lcr}$ と $\sigma_{0cr}$ を各々式(2.1)の $\sigma_{cr}$ に代入して次式を得る。

$$\beta_1 = \pi \sqrt{\frac{8.4s^3}{2.1s-2} \frac{E}{12(1-\mu^2)} \frac{1}{\sigma_{0.2}}} R\quad (2.19)$$

$$\beta_0 = \pi \sqrt{\frac{23.9}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} R\quad (2.20)$$

さらに、式(2.19)と(2.20)から $R$ を消去して、 $\beta_1$ と $\beta_0$ の関係として次式を得る。

$$\beta_1 = s \sqrt{\frac{8.4s}{23.9(2.1s-2)}} \beta_0\quad (2.21)$$

以上より、面内曲げを受ける、縦補剛された長方形板は、その幅厚比 $b/t$ が次の範囲にあるとき全体座屈を起こす。

$$\beta_0 < b/t < \beta_1\quad (2.22)$$

### 2.3 縦補剛材の幅厚比

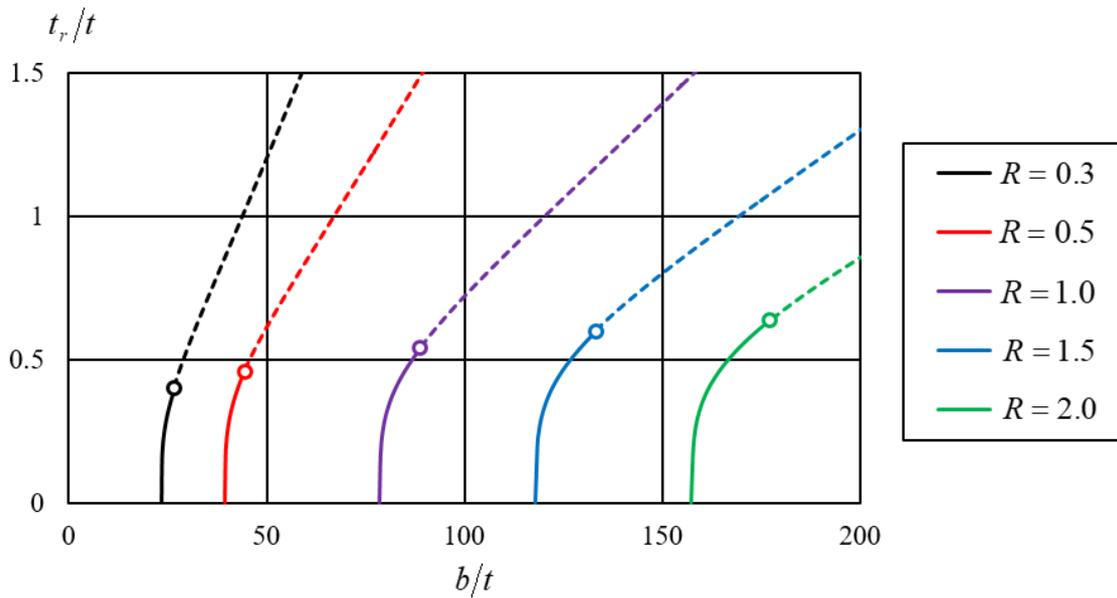
縦補剛材を、圧縮を受ける自由突出板とみなし、アルミニウム合金の0.2%耐力を維持する限界の幅厚比パラメータの値に対して縦補剛材の幅厚比を決める。アルミニウム合金A6061-T6に対して限界の幅厚比パラメータの値が0.60であるので<sup>11)</sup>、縦補剛材の幅厚比 $\beta_r$ は次式で与えられる。

$$\beta_r = 0.60\pi \sqrt{\frac{0.425}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}}\quad (2.23)$$

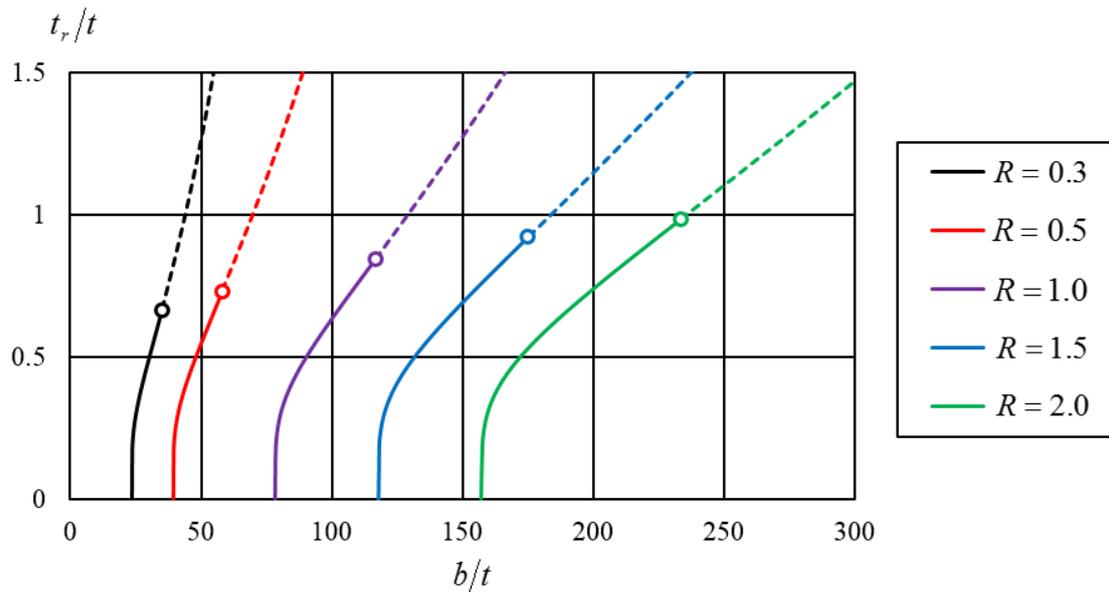
0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ に対してA6061-T6の245MPa、さらに $E=70\text{GPa}$ 、 $\mu=0.3$ を代入して、 $\beta_r=6.28$ を得る。

## 2.4 縦補剛材と長方形板の板厚比と長方形板の幅厚比の関係

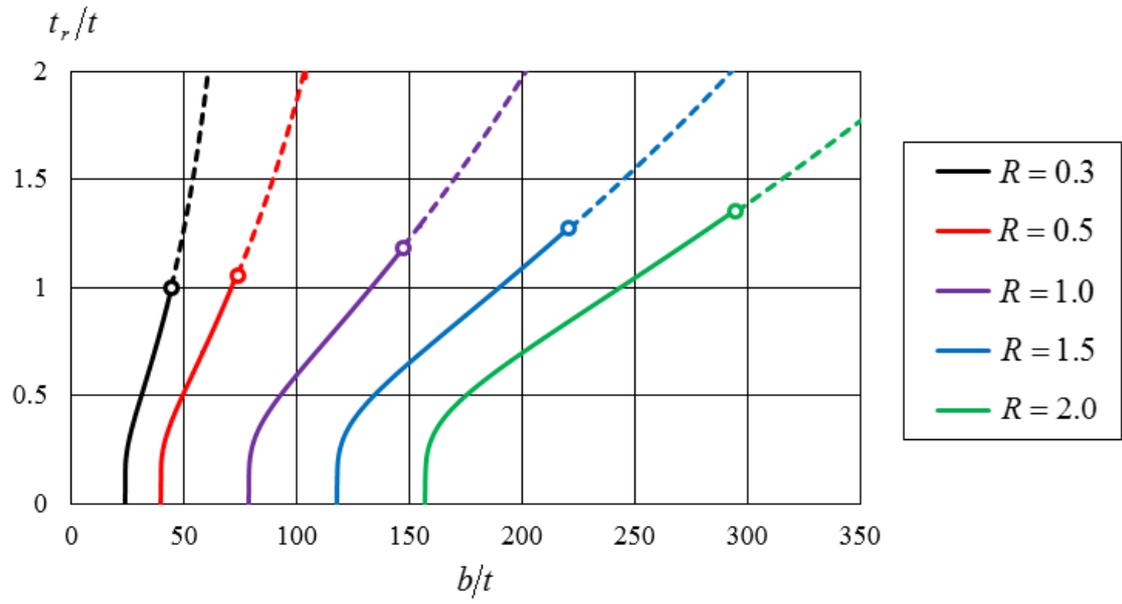
片側縦補剛された長方形板に対して，式(2.13)が与える，縦補剛材と長方形板の板厚比 $t_r/t$ と長方形板の幅厚比 $b/t$ の関係を図2.4に示す．図はパネル数 $s$ で異なる．図の各曲線は，式(2.20)で与えられる，縦補剛された長方形板の幅厚比の適用範囲の下限値 $\beta_0$ から始まる．各曲線の中抜きの丸は，式(2.19)で与えられる，縦補剛された長方形板の幅厚比の適用範囲の上限値 $\beta_1$ に対応する．破線は，式(2.13)が与える関係の適用範囲外である． $b/t$ が大きくなるに従って， $t_r/t$ が大きくなる．



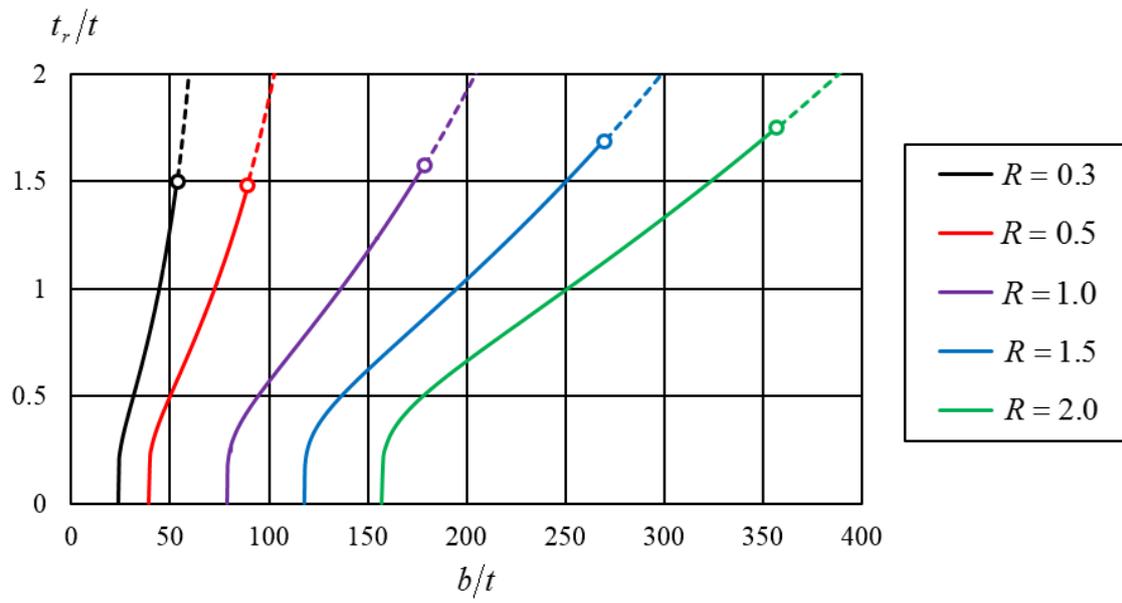
(a)  $s=2$



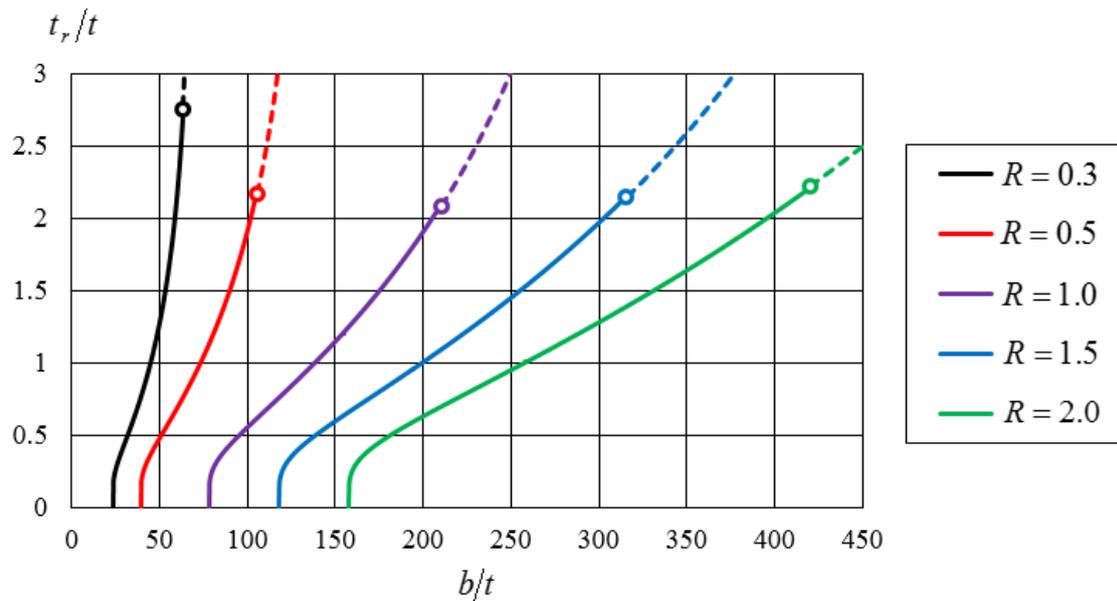
(b)  $s=3$



(c)  $s=4$



(d)  $s=5$



(e)  $s=6$

図 2.4  $t_r/t$  と  $b/t$  の関係

## 2.5 最適断面形状

縦補剛された長方形板の全断面積は次式で与えられる.

$$A = bt + j(s-1)b_r t_r \quad (2.24)$$

ここに,  $A$ : 縦補剛された長方形板の全断面積

縦補剛された長方形板の全断面積と同じ大きさの断面積を有する無補剛の長方形板の板厚, すなわち等価板厚が次式で与えられる.

$$t_e = \frac{A}{b} = t + \frac{j(s-1)b_r t_r}{b} \quad (2.25)$$

ここに,  $t_e$ : 等価板厚

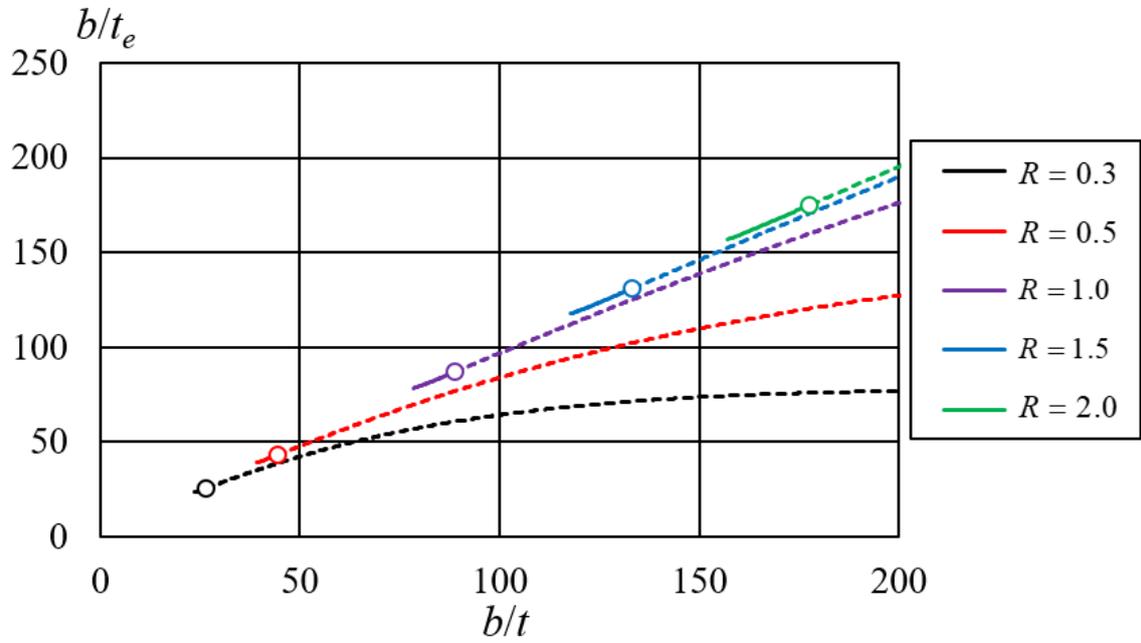
この等価板厚を用いた幅厚比  $b/t_e$  が次式で定義される.

$$\frac{b}{t_e} = \frac{b^2}{A} = \frac{(b/t)^2}{b/t + \beta_r j(s-1)(t_r/t)^2} \quad (2.26)$$

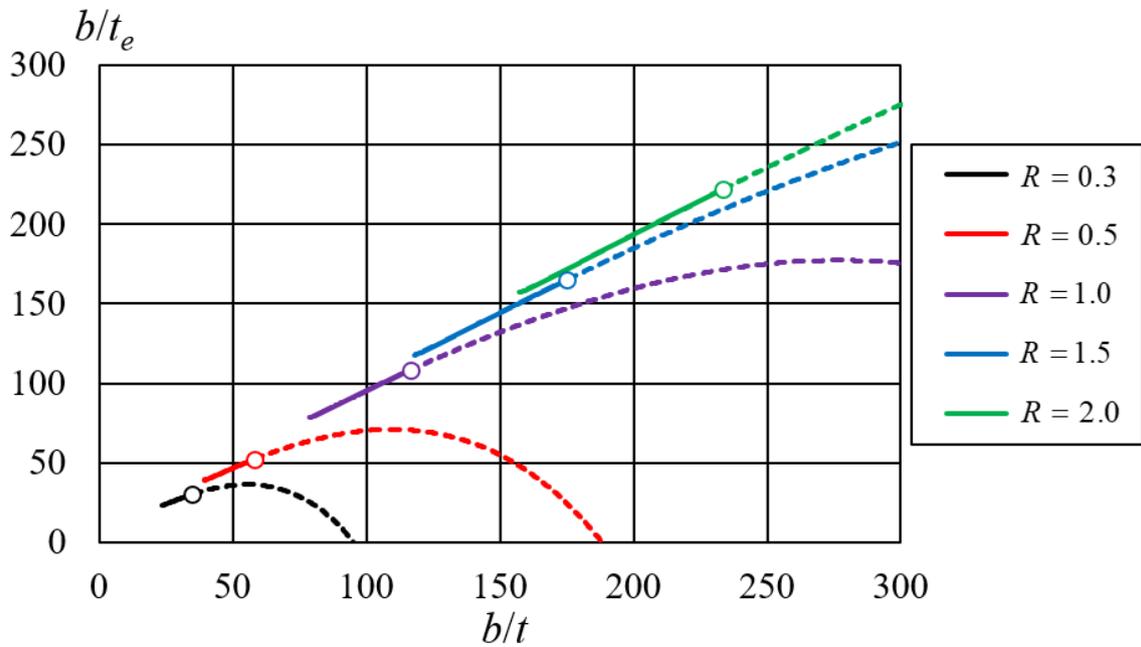
$b/t_e$  を幅等価厚比と呼ぶ. 式(2.26)が示すように, 板幅  $b$  が一定のとき,  $b/t_e$  が大きくなることは, 縦補剛された長方形板の全断面積  $A$  が減少することを示す.

式(2.13)の  $t_r/t$  を式(2.26)に代入して得られる, 片側補剛された長方形板の  $b/t_e$  と  $b/t$  の関係を図 2.5 に示す. 図はパネル数  $s$  で異なる. 中抜きの丸は  $\beta_1$  に対応し, 各曲線の破線は, 式(2.26)の適用範囲外である. 図 2.5(d)と(e)の中塗りの丸は,  $b/t_e$  の極大値を表す. 幅厚比パラメータ  $R$  の各値に対して, 中抜きの丸または中塗りの丸のどちらか大きい方の  $b/t_e$  を

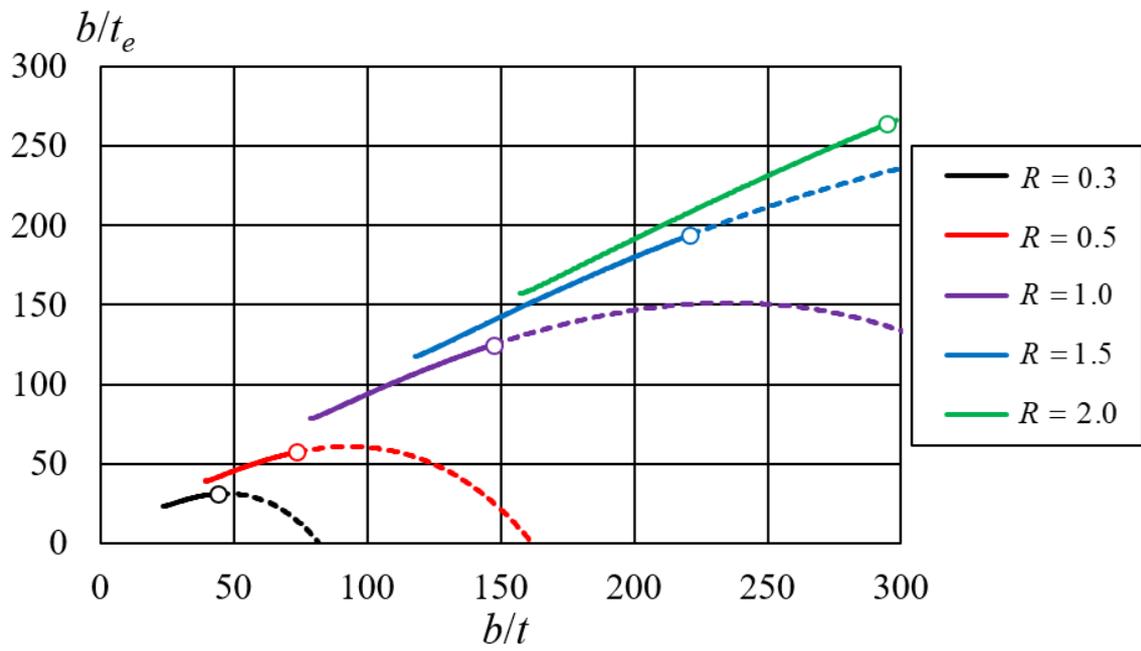
$b/t_{em}$  で表す. 中塗りの丸がない場合には中抜き丸の  $b/t_e$  を  $b/t_{em}$  で表す. 縦補剛された長方形板の全断面積  $A$  は  $b/t_{em}$  で最小になる.



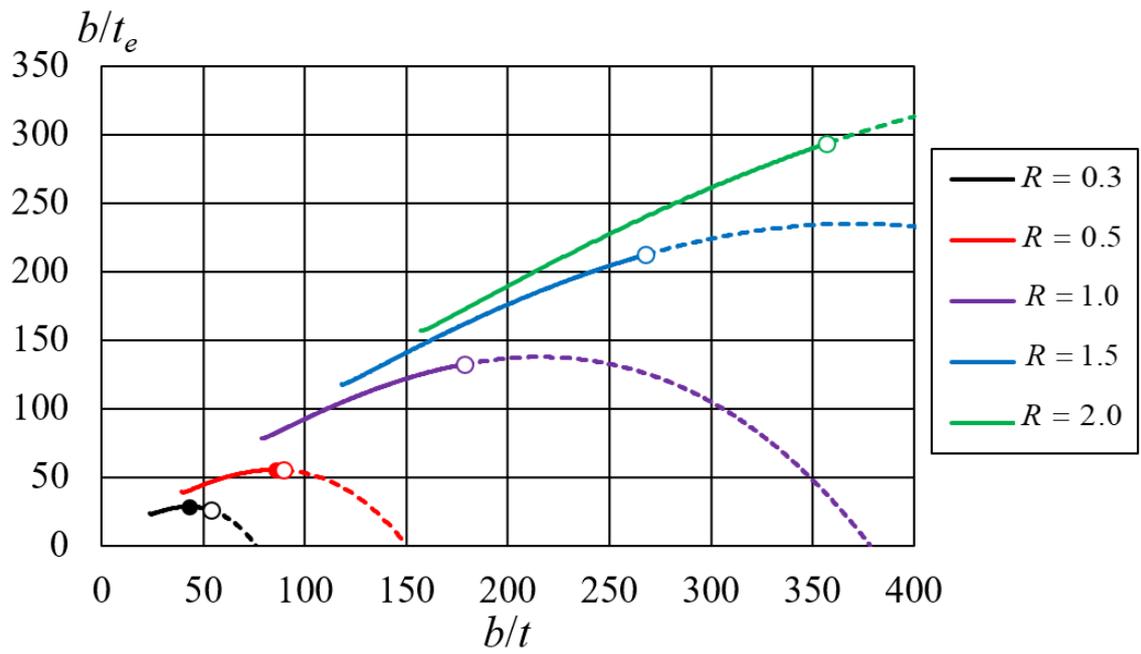
(a)  $s=2$



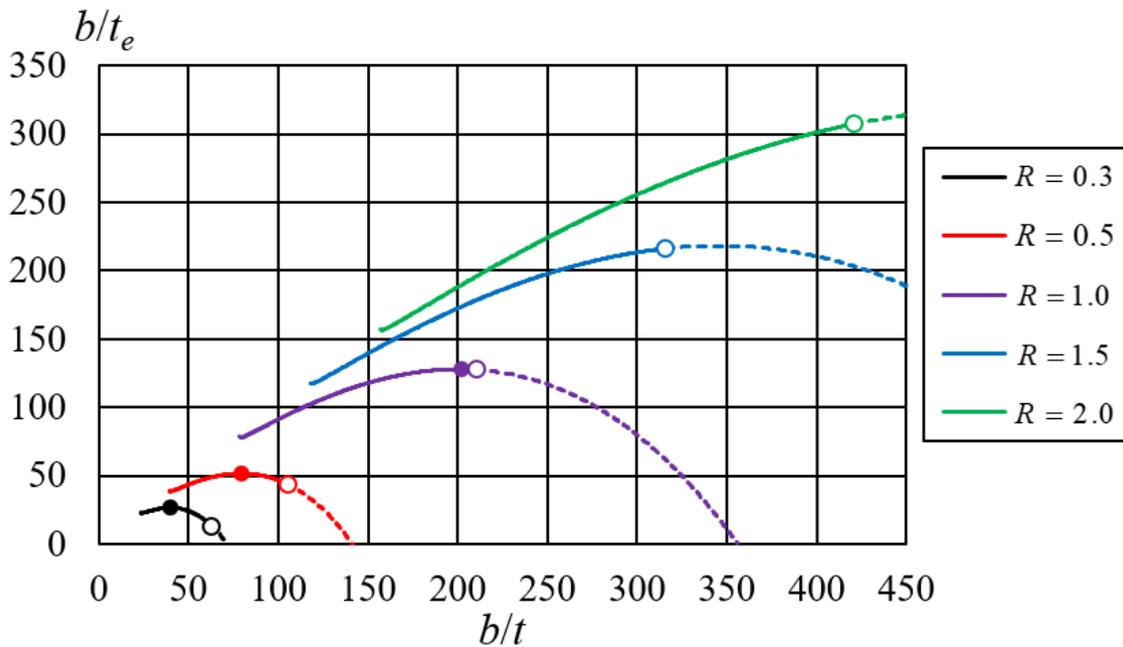
(b)  $s=3$



(c)  $s=4$



(d)  $s=5$



(e)  $s=6$

図 2.5  $b/t_e$  と  $b/t$  の関係

$b/t_{em}$  と  $R$  の関係を図 2.6 に示す.  $R$  の 0.1 刻みに対して  $b/t_{em}$  がプロットされている.  $s=1$  の曲線は無補剛の長方形板に対するもので, 式(2.20)で与えられる. 中抜きの丸は,  $b/t_e$  が  $\beta_1$  で最大値をとり, 中塗りの丸は,  $b/t_e$  が  $\beta_1$  未満で極大値が最大値になったことを表している.

図 2.6 は,  $R$  のある値に対して, 各パネル数  $s$  における  $b/t_e$  の最大値を示し, 反対に,  $b/t_{em}$  のある値に対して, 各パネル数  $s$  における  $R$  の最小値を示している. 座屈強度は  $R$  に関して単調減少の関数となるので,  $R$  の最小値に対して, 座屈強度は最大になる. したがって,  $b/t_{em}$  を与える断面形状が, 最大の座屈強度を与える最適断面形状である. 最適断面形状を与える  $b/t$  と  $b/t_{em}$  の関係および  $t_r/t$  と  $b/t_{em}$  の関係を, それぞれ図 2.7, 2.8 に示す.

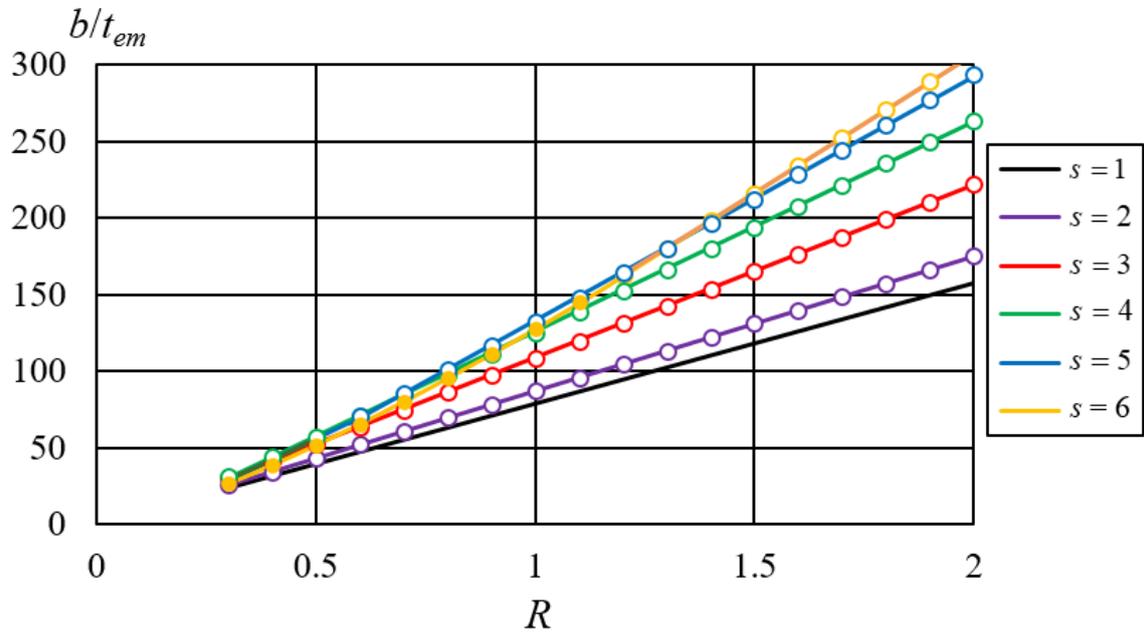


図 2.6  $b/t_{em}$  と  $R$  の関係

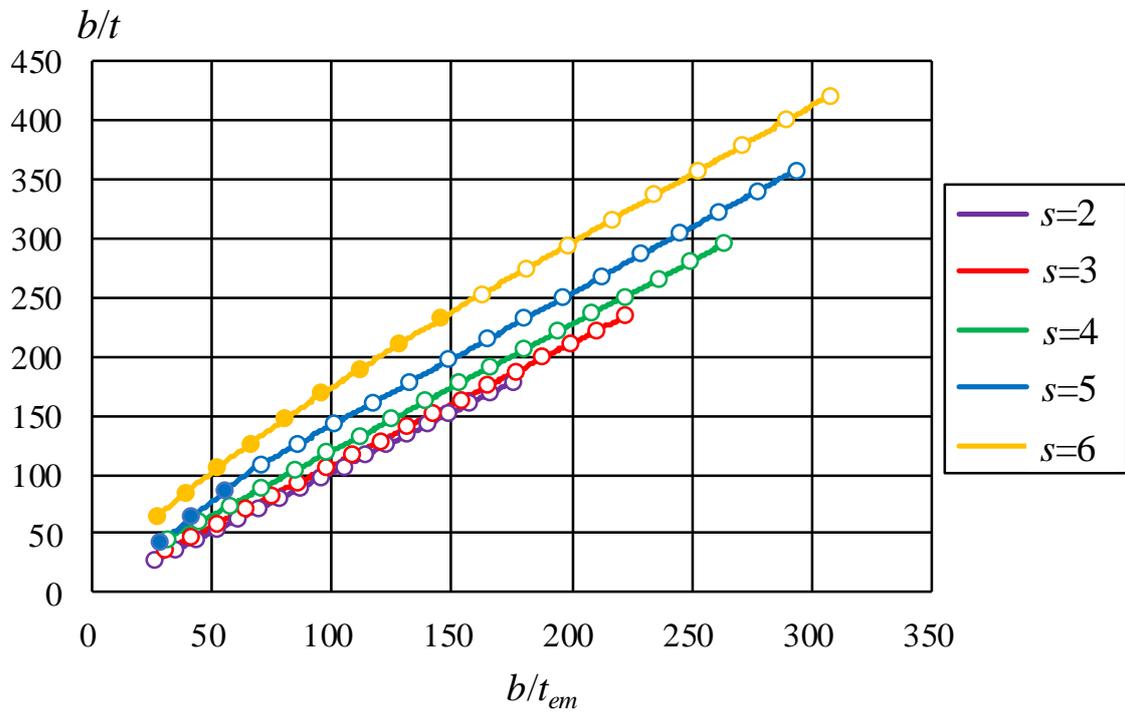


図 2.7  $b/t$  と  $b/t_{em}$  の関係

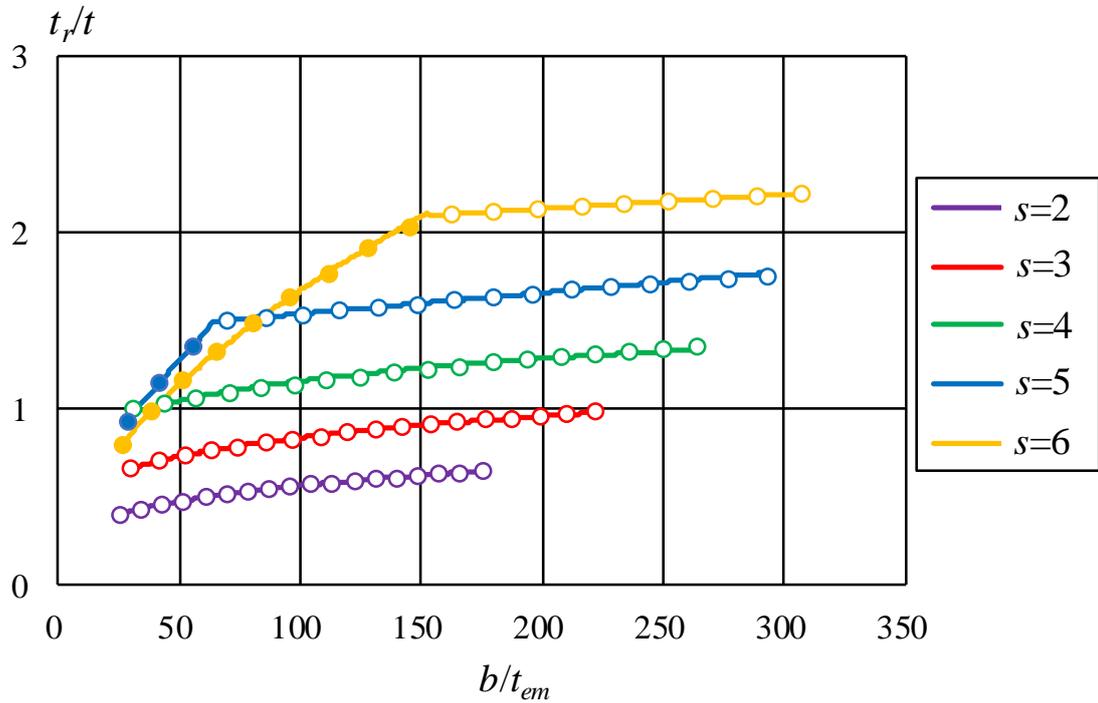


図 2.8  $t_r/t$  と  $b/t_{em}$  の関係

図 2.6, 2.7, 2.8 の各曲線は次式で与えられる.

$s=1$  に対して

$$\frac{b}{t_{em}} = \beta_0 = 78.56R \quad (0.30 \leq R \leq 2.00) \quad (2.27)$$

$s=2$  に対して

$$\frac{b}{t_{em}} = 87.905R - 0.836 \quad (0.30 \leq R \leq 2.00) \quad (2.28)$$

$$\frac{b}{t} = 1.01 \frac{b}{t_{em}} + 0.845 \quad (25.535 \leq b/t_{em} \leq 174.974) \quad (2.29)$$

$$\frac{t_r}{t} = 0.18 \left( \frac{b}{t_{em}} \right)^{0.247} \quad (25.535 \leq b/t_{em} \leq 174.974) \quad (2.30)$$

$s=3$  に対して

$$\frac{b}{t_{em}} = 112.868R - 4.223 \quad (0.30 \leq R \leq 2.00) \quad (2.31)$$

$$\frac{b}{t} = 1.034 \frac{b}{t_{em}} + 4.369 \quad (29.637 \leq b/t_{em} \leq 221.513) \quad (2.32)$$

$$\frac{t_r}{t} = 0.335 \left( \frac{b}{t_{em}} \right)^{0.198} \quad (29.637 \leq b/t_{em} \leq 221.513) \quad (2.33)$$

s=4 に対して

$$\frac{b}{t_{em}} = 137.201R - 11.645 \quad (0.30 \leq R \leq 2.00) \quad (2.34)$$

$$\frac{b}{t} = 1.073 \frac{b}{t_{em}} + 12.512 \quad (29.515 \leq b/t_{em} \leq 262.757) \quad (2.35)$$

$$\frac{t_r}{t} = 0.584 \left( \frac{b}{t_{em}} \right)^{0.1484} \quad (29.515 \leq b/t_{em} \leq 262.757) \quad (2.36)$$

s=5 に対して

$$\frac{b}{t_{em}} = \begin{cases} 133.727R - 11.733 & (0.30 \leq R \leq 0.57) \\ 159.740R - 26.822 & (0.57 \leq R \leq 2.00) \end{cases} \quad (2.37)$$

$$\frac{b}{t} = \begin{cases} 1.633 \frac{b}{t_{em}} - 4.125 & (28.385 \leq b/t_{em} \leq 64.491) \\ 1.118 \frac{b}{t_{em}} + 30.004 & (64.491 \leq b/t_{em} \leq 292.54) \end{cases} \quad (2.38)$$

$$\frac{t_r}{t} = \begin{cases} 0.0155 \frac{b}{t_{em}} + 0.495 & (28.385 \leq b/t_{em} \leq 64.491) \\ 0.0012 \frac{b}{t_{em}} + 1.418 & (64.491 \leq b/t_{em} \leq 292.54) \end{cases} \quad (2.39)$$

s=6 に対して

$$\frac{b}{t_{em}} = \begin{cases} 127.616R^{1.3013} & (0.30 \leq R \leq 1.15) \\ 181.485R - 55.89 & (1.15 \leq R \leq 2.00) \end{cases} \quad (2.40)$$

$$\frac{b}{t} = \begin{cases} 5.064 \left( \frac{b}{t_{em}} \right)^{0.768} & (26.694 \leq b/t_{em} \leq 152.076) \\ 1.158 \frac{b}{t_{em}} + 64.76 & (152.076 \leq b/t_{em} \leq 307.345) \end{cases} \quad (2.41)$$

$$\frac{t_r}{t} = \begin{cases} 0.129 \left( \frac{b}{t_{em}} \right)^{0.556} & (26.694 \leq b/t_{em} \leq 152.076) \\ 0.0008 \frac{b}{t_{em}} + 1.974 & (152.076 \leq b/t_{em} \leq 307.345) \end{cases} \quad (2.42)$$

式(2.27)は式(2.20)から与えられ、式(2.28)~(2.42)は、図 2.6, 2.7, 2.8 の各パネル数  $s$  に対するプロット点に最小二乗法を適用することによって与えられる。プロット点の数値データを付録 A に示す。

## 2.6 考慮するパネル数

式(2.1)より座屈強度は次式で与えられる.

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{0.2}} = \frac{1}{R^2} \quad (2.43)$$

式(2.27), (2.28), (2.31), (2.34), (2.37), (2.40)をそれぞれ式(2.43)に代入して, 各パネル数  $s$  に対する座屈強度  $\sigma_{cr}/\sigma_{0.2}$  と最適断面形状に対する幅等価厚比  $b/t_{em}$  の関係が次のように与えられる.

$s=1$  に対して,

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{0.2}} = \left( \frac{78.56}{b/t_{em}} \right)^2 \quad (0 \leq b/t_{em} \leq 157.12) \quad (2.44)$$

$s=2$  に対して,

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{0.2}} = \left( \frac{87.905}{b/t_{em} + 0.836} \right)^2 \quad (25.535 \leq b/t_{em} \leq 174.974) \quad (2.45)$$

$s=3$  に対して,

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{0.2}} = \left( \frac{112.868}{b/t_{em} + 4.223} \right)^2 \quad (29.637 \leq b/t_{em} \leq 221.513) \quad (2.46)$$

$s=4$  に対して,

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{0.2}} = \left( \frac{137.201}{b/t_{em} + 11.645} \right)^2 \quad (29.515 \leq b/t_{em} \leq 262.757) \quad (2.47)$$

$s=5$  に対して,

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} \left( \frac{133.727}{b/t_{em} + 11.733} \right)^2 & (28.385 \leq b/t_{em} \leq 64.491) \\ \left( \frac{159.475}{b/t_{em} + 26.41} \right)^2 & (64.491 \leq b/t_{em} \leq 292.54) \end{cases} \quad (2.48)$$

$s=6$  に対して,

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} \left( \frac{127.616}{b/t_{em}} \right)^{1.5369} & (26.694 \leq b/t_{em} \leq 152.076) \\ \left( \frac{181.485}{b/t_{em} + 55.89} \right)^2 & (152.076 \leq b/t_{em} \leq 307.345) \end{cases} \quad (2.49)$$

式(2.44)~(2.49)が与える  $\sigma_{cr}/\sigma_{0.2}$  と  $b/t_{em}$  の関係を図 2.9 に示す.  $s=6$  に対する  $\sigma_{cr}/\sigma_{0.2}$  は,  $s=5$  に対するそれに比べ,  $b/t_{em}$  が約 190 以下で小さくなる. したがって,  $s$  が 6 以上の縦補剛された長方形板は次章で考慮されない.

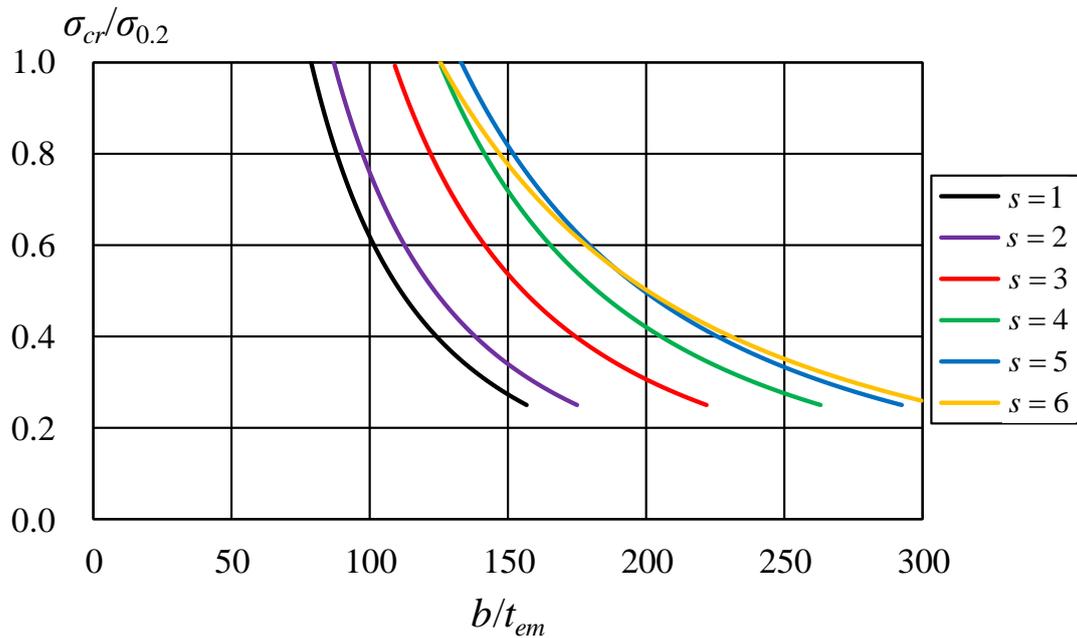
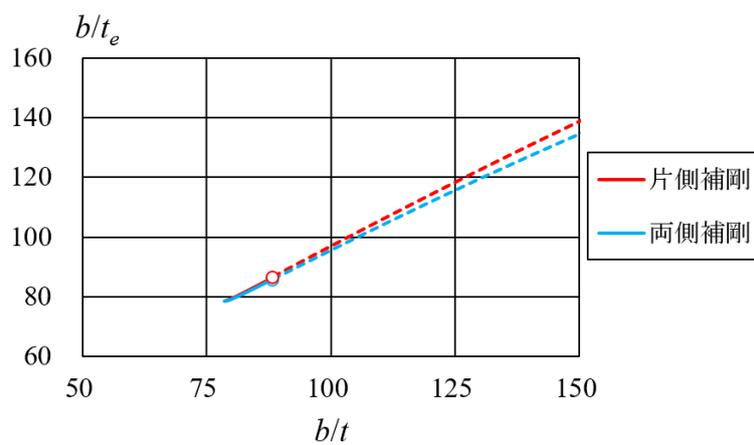


図 2.9  $\sigma_{cr}/\sigma_{0.2}$  と  $b/t_{em}$  の関係

### 2.7 片側補剛と両側補剛

片側補剛 ( $j=1$ ) と両側補剛 ( $j=2$ ) に対して  $b/t_e$  と  $b/t$  の関係の比較を図 2.10 に示す。これは  $R=1.0$  に対する結果である。図はパネル数  $s$  で異なる。中抜きの丸は  $\beta_1$  に対応し、各曲線の破線は、式(2.26)の適用範囲外である。片側補剛の  $b/t_e$  が両側補剛の  $b/t_e$  を上回る。すなわち、同一の幅厚比パラメータ  $R$  の値に対して、片側補剛の長方形板の全断面積が両側補剛のそれより小さくなる。したがって次章では、片側補剛 ( $j=1$ ) の長方形板が扱われる。



(a)  $s=2$

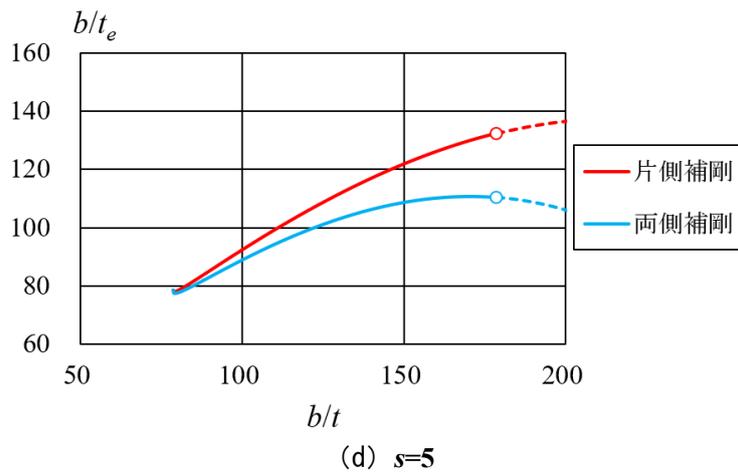
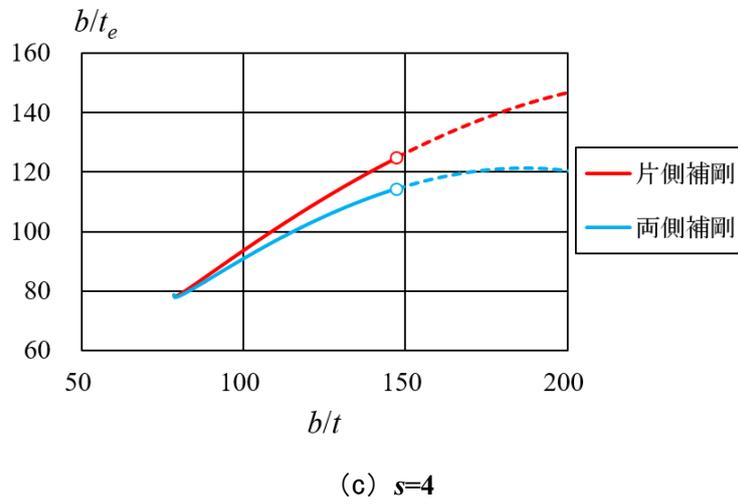
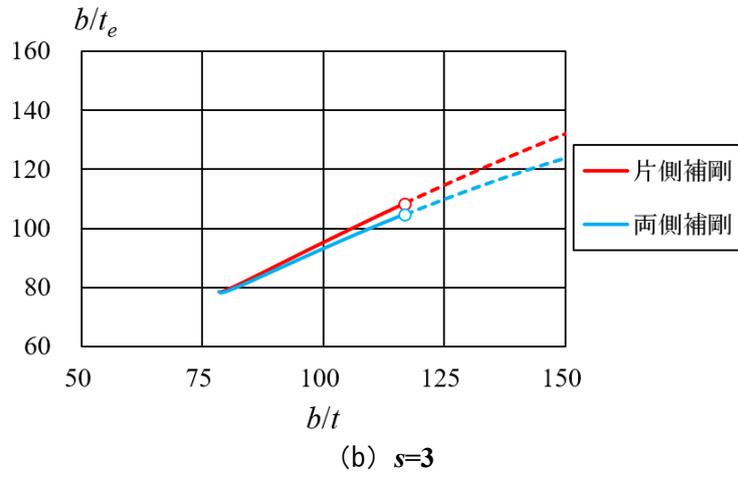


図 2.10  $b/t_e$  と  $b/t$  の関係に対する片側補剛と両側補剛の比較 ( $R=1.0$ )

### 第3章 FEMによる弾塑性有限変位解析

#### 3.1 解析対象

前章で与えられた、座屈強度に関する最適断面形状を有する、縦補剛された長方形板の面内曲げ耐荷力をFEMによる弾塑性有限変位解析によって明らかにする。図3.1を参照して、解析対象は、長さが $a$ 、幅が $b$ の、片側に縦補剛された長方形板である。縦補剛材の幅厚比 $\beta_r$ を6.28とし、板の要素数 $s$ に対して、2, 3, 4, 5を考慮する。幅 $b$ を600mmとして、各寸法を与える。

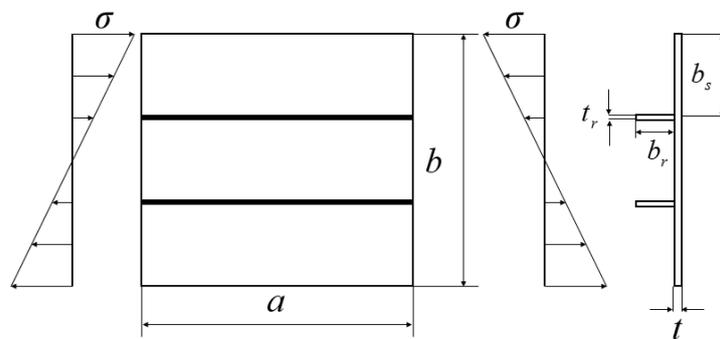


図 3.1 面内曲げを受ける、縦補剛された長方形板

縦補剛された長方形板の縦横比 $a/b$ は、次式で与えられる、縦補剛された長方形板の座屈係数が最小となるような縦横比とする<sup>12)</sup>。

$$\frac{a}{b} = \frac{2}{3}(1 + \gamma s)^{c_4} \quad (3.1)$$

ここに、 $c_4$  : パネル数 $s$ が2の場合0.18, パネル数 $s$ が3以上の場合0.25

式(2.8)を式(3.1)に代入して、次式を得る。

$$\frac{a}{b} = \frac{2}{3} \left\{ 1 + \frac{4(1 - \mu^2)js\beta_r^3(t_r/t)^4}{b/t} \right\}^{c_4} \quad (3.2)$$

$s=2, 3, 4, 5$ の各パネル数に対して、2.5節で与えられた $b/t$ と $b/t_{em}$ の関係および $t_r/t$ と $b/t_{em}$ の関係を式(3.2)に代入して得られる $a/b$ と $b/t_{em}$ 関係を図3.2に示す。同図の $s=5$ の関係が $b/t_{em}$ が約65の前後で変化するのは、図2.7と2.8において、 $s=5$ の曲線が中塗りの点の曲線から中抜き点の曲線に変化することに起因する。

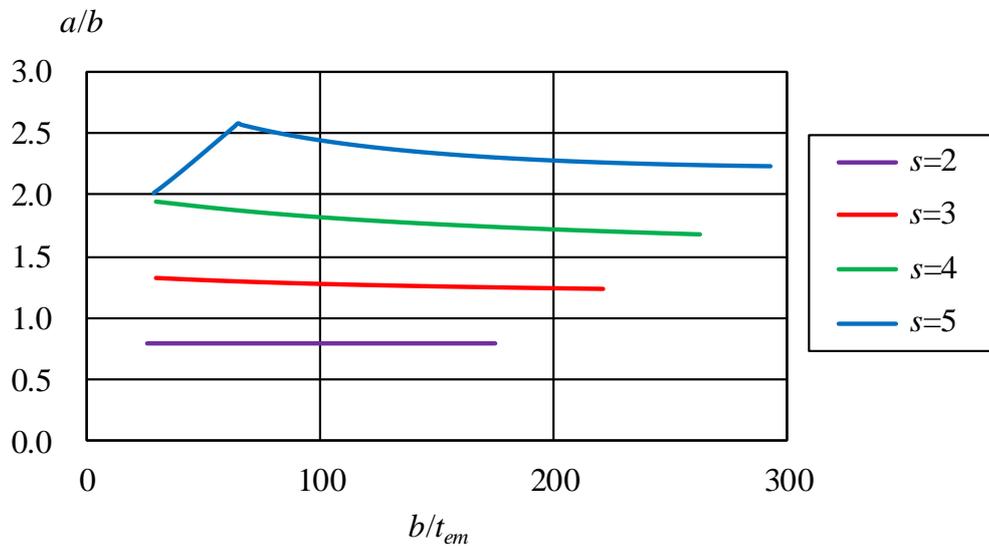


図 3.2  $a/b$  と  $b/t_{em}$  の関係

### 3.2 接合による強度低下と残留応力

縦補剛されたアルミニウム合金桁は、図1.2に示すように、摩擦攪拌接合により押出形材を突合せ接合することによって製作される。摩擦攪拌接合はMIG溶接に比べて入熱量が少ないので、摩擦攪拌接合部の強度低下とその範囲はMIG溶接のそれらより小さくなるが、摩擦攪拌接合においても接合部は強度低下を生じる。これに対して、図3.3に示すように、強度低下が生じる、接合中心から各側25mm、すなわち50mmの範囲の板厚を、次式で与えられる板厚に増厚することにより、0.2%耐力に関して、接合部の断面強度を母材のそれと同じにすることができる<sup>13)</sup>。

$$t_j = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{j0.2}} t \quad (3.3)$$

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(3.3)によって増厚された長方形板の面内曲げ耐荷力は、非接合板の面内曲げ耐荷力より高くなることが示されている<sup>14)</sup>。したがって、摩擦攪拌接合による接合部の強度低下および残留応力を考慮せず、非接合板のみを考慮する。

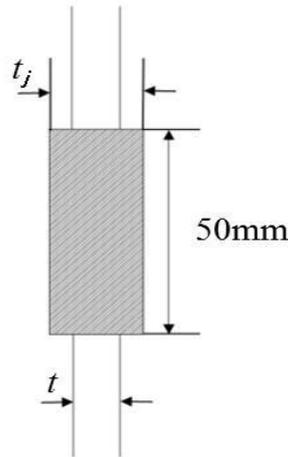


図 3.3 部分的に増厚された板

### 3.3 初期たわみ

面内曲げを受ける，縦補剛された長方形板は，長方形板の幅厚比  $b/t$  が式(2.22)の範囲で，長方形板と縦補剛材が一体となって全体座屈を起こし， $b/t$  が  $\beta_1$  を超すと，縦補剛材で区切られた最上段の板要素が局部座屈を起こす．縦補剛された長方形板の，座屈強度に関する最適断面形状は， $s=5$  の一部を除いて， $\beta_1$  で生じる．したがって，全体座屈に対する初期たわみのみならず，局部座屈に対する初期たわみも耐荷力に影響すると考え，次の二つの初期たわみを考慮する．

(a) 全体座屈に対する初期たわみ

$$w_{0g} = \frac{b}{250} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (3.4)$$

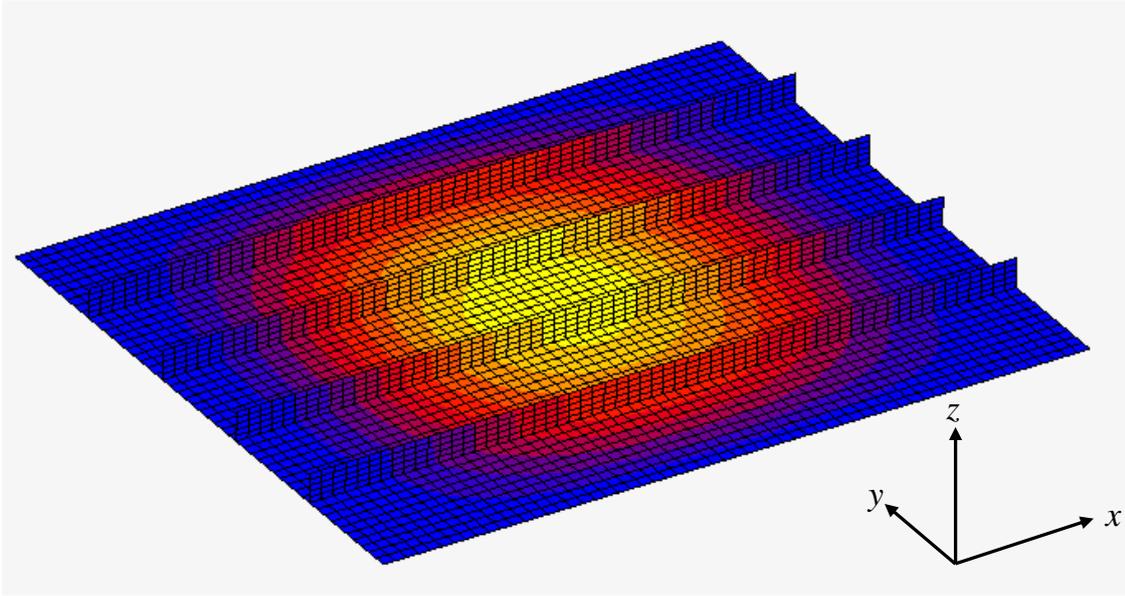
(b) 局部座屈に対する初期たわみ

$$w_{0l} = \frac{b_s}{150} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{s\pi y}{b}\right) \quad (3.5)$$

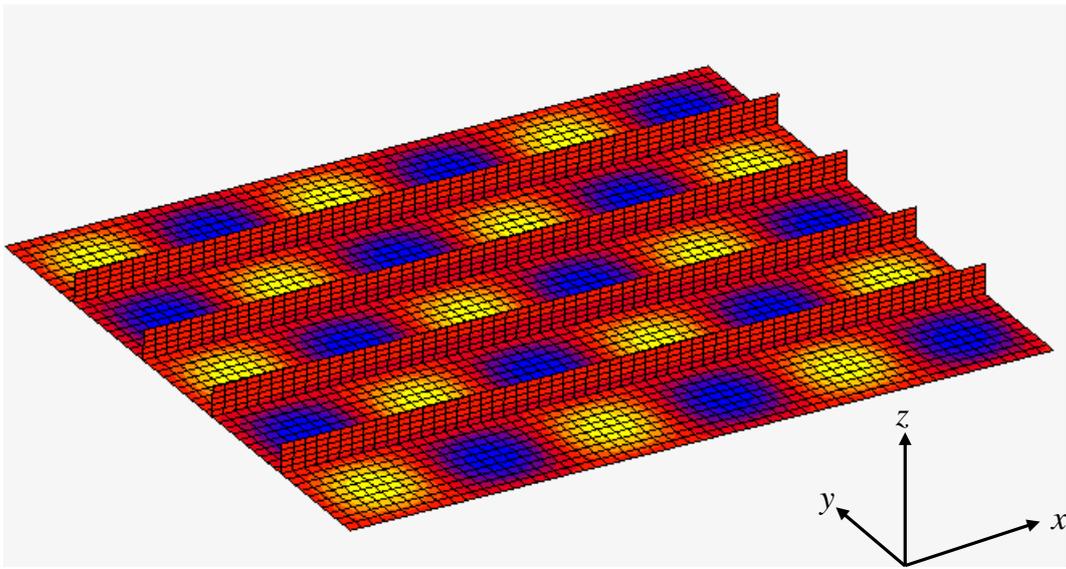
ここに， $w_{0g}$ ， $w_{0l}$ ：それぞれ，全体座屈と局部座屈に対する初期たわみ

$m$ ：局部座屈に対する初期たわみの  $x$  軸方向のモード数

式(3.4)の  $b/250$  は，アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）<sup>13)</sup> で規定される，桁ウェブに対する製作精度であり，式(3.5)の  $b_s/150$  は，同指針（案）で規定される，隣接するリブ間の板要素に対する製作精度である．参考として，式(3.4)と(3.5)が与える初期たわみ形状を図3.4に示す．



(a) 全体座屈に対する初期たわみ形状



(b) 局部座屈に対する初期たわみ形状

図 3.4 初期たわみ形状

局部座屈に対する初期たわみの $x$ 軸方向のモード数 $m$ に関しては、面内曲げを受ける、縦補剛された長方形板において、縦補剛材で区切られた最上段の板要素が局部座屈を起こす座屈波形のモード数とする。縦補剛材で区切られた最上段の板要素は、4辺単純支持された、圧縮と曲げを受ける長方形板とみなすことができる。そのような長方形板の座屈係数 $k$ と縦横比 $a/b_s$ の関係が次式で与えられる（付録B参照）。

$$k = \frac{\left(1 - \frac{\varphi_s}{2}\right)(f_1 + f_2) - \sqrt{\left(1 - \frac{\varphi_s}{2}\right)(f_1 - f_2)^2 + \left(\frac{32}{9\pi^2}\varphi_s\right)^2 f_1 f_2}}{2\left\{\left(1 - \frac{\varphi_s}{2}\right)^2 - \left(\frac{16}{9\pi^2}\varphi_s\right)^2\right\}} \quad (3.6)$$

ここに,  $f_1 = \left(\frac{m}{a/b_s} + \frac{1}{m} \frac{a}{b_s}\right)^2$

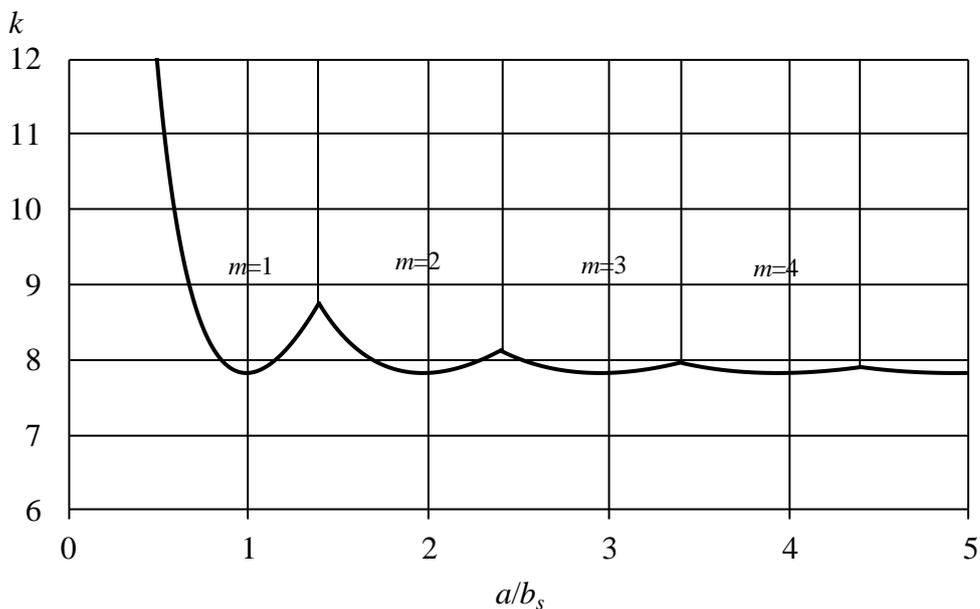
$$f_2 = \left(\frac{m}{a/b_s} + \frac{4}{m} \frac{a}{b_s}\right)^2$$

$\varphi_s = 2/s$  :  $a \times b_s$  の板要素の上下縁の応力比

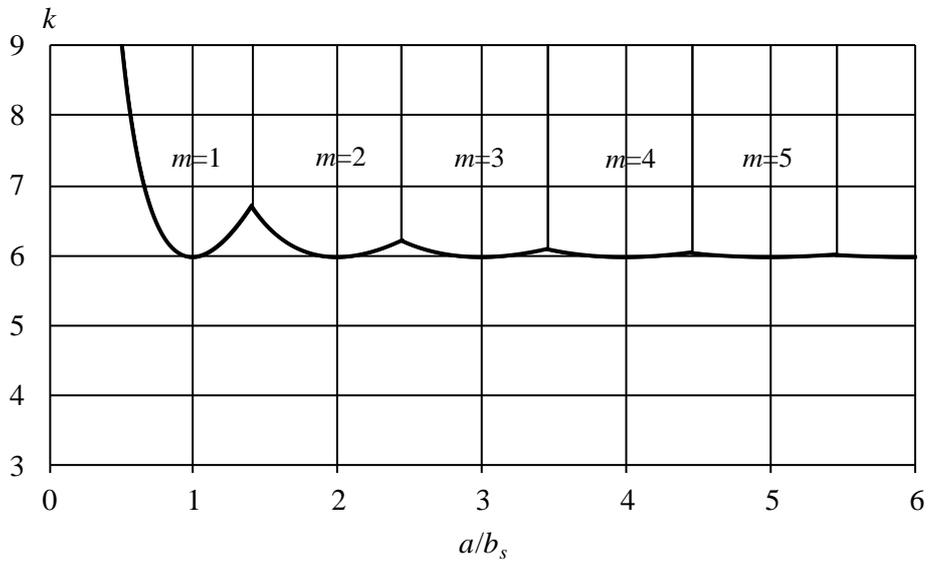
座屈係数  $k$  と縦横比  $a/b_s$  の関係を **図3.5** に示す. 同図のモード数の境界値を **表3.1** に示す. 縦補剛された長方形板の縦横比  $a/b$  に対する, 縦補剛材で区切られた最上段の板要素の縦横比  $a/b_s$  が次式によって与えられる.

$$\frac{a}{b_s} = s \frac{a}{b} \quad (3.7)$$

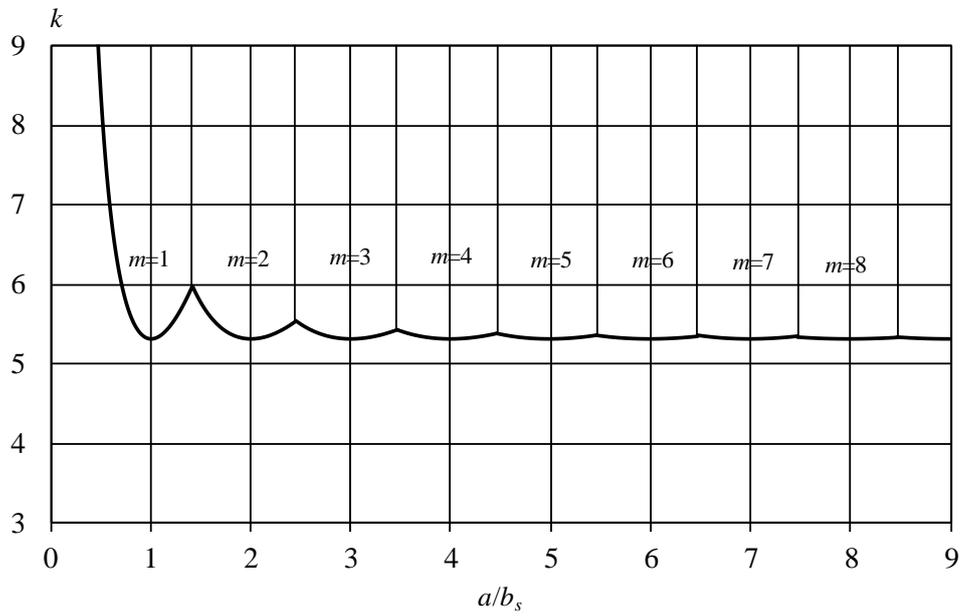
式(3.7)によって与えられる  $a/b_s$  の値に対する座屈モード数を **図3.5** から読み取り, これを式(3.5)の  $m$  に採用する.



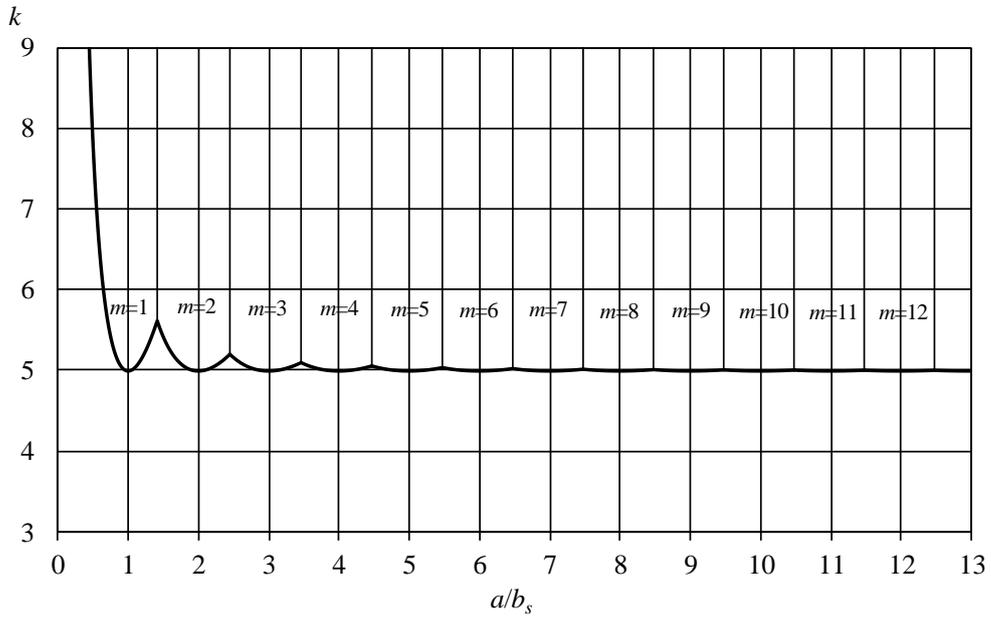
(a)  $s=2$



(b)  $s=3$



(c)  $s=4$



(d)  $s=5$

図3.5 圧縮と曲げを受ける長方形板の座屈係数 $k$ と縦横比 $a/b_s$ の関係

表 3.1 図 3.5 のモード数の境界値

$s$	2	3	4	5
$a/b_s$	1.3875	1.4072	1.4110	1.4124
	2.4068	2.4383	2.4445	2.4466
	3.4050	3.4487	3.4572	3.4601
	4.3965	4.4524	4.4633	4.4671
		5.4532	5.4664	5.4711
			6.4680	6.4735
			7.4686	7.4750
			8.4686	8.4759
				9.4763
				10.4765
				11.4764
				12.4762

### 3.4 応力-ひずみ関係

アルミニウム合金の応力-ひずみ関係に対して次式を用いる<sup>15)</sup>.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (\sigma \leq \sigma_{0.2}) \quad (3.8)$$

$$\sigma = \sigma_{0.2} \quad (\sigma \geq \sigma_{0.2}) \quad (3.9)$$

ここに,  $\varepsilon$  : ひずみ

$\sigma$  : 応力

$E$  : ヤング係数 (=70MPa)

$\sigma_{0.2}$  : 0.2%耐力

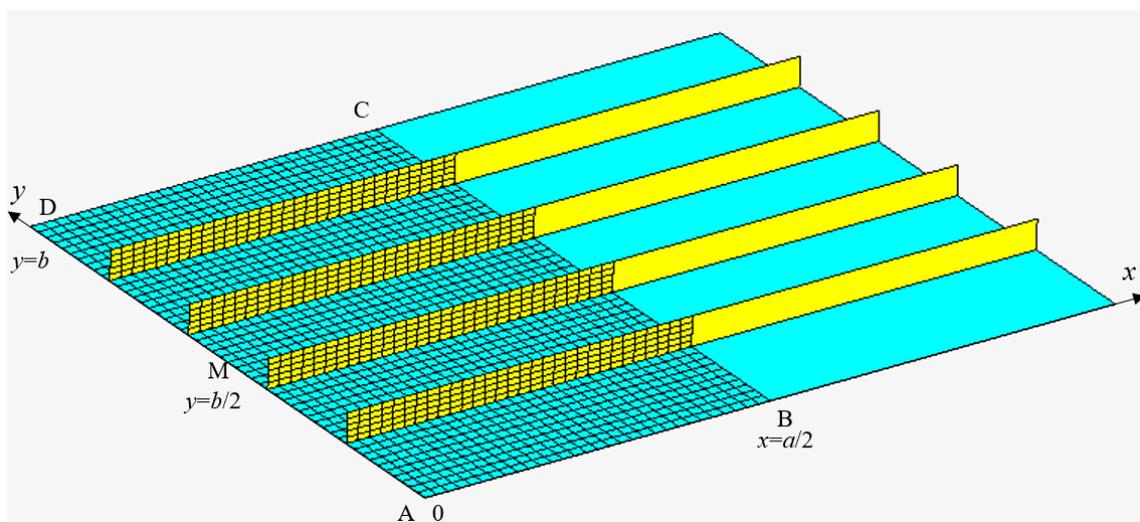
$n$  : ひずみ硬化パラメータ

アルミニウム合金 A6061-T6 の 0.2%耐力に対して, 日本工業規格 (JIS 規格) に規定される 245MPa を用いる. 同合金に対するひずみ硬化パラメータ  $n$  の値に対して 29.1 を用いる. この値は, 引張試験の結果に対して, 非超過確率 5% に対する値である<sup>15)</sup>

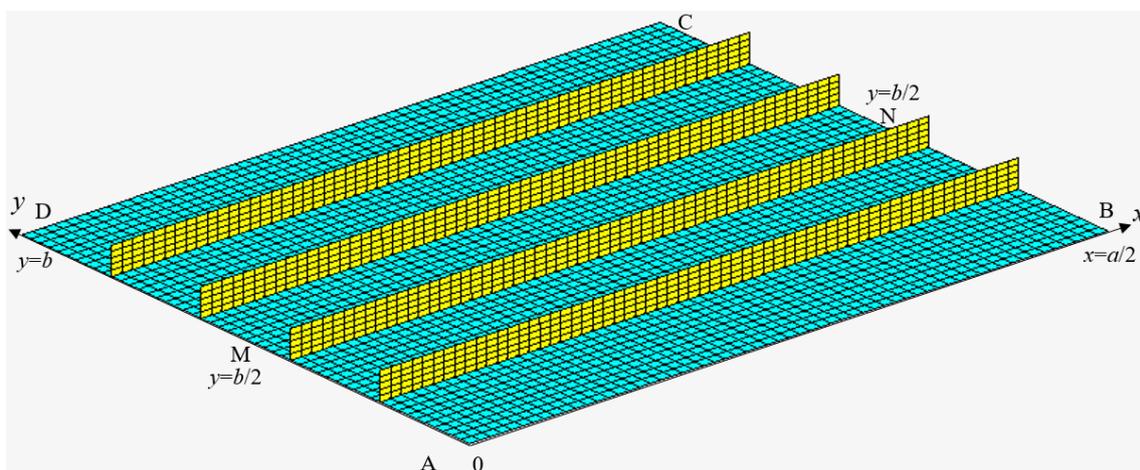
### 3.5 境界条件

汎用有限要素プログラム MARC<sup>16)</sup>を用いて, 面内曲げを受ける, 縦補剛された長方形板の弾塑性有限変位解析を行う. 式(3.4)で与えられる全体座屈に対する初期たわみ, および式(3.5)で与えられる局部座屈に対する初期たわみにおいて  $m$  が奇数の場合を解析するとき, 初期たわみ形状が  $x=a/2$  に関して対称となるので, 図 3.6(a)に示すように, 解析対象の半分を要素分割する. これに対する境界条件を表 3.2(a)に示す. 縦補剛された長方形板は 4 辺単純支持され, 中点 M を中心として,  $x=0$  上の辺 AD を  $z$  軸回りに強制回転させることにより曲げ荷重を与える. ただし, 中点 M の  $x$  軸方向の変位は拘束しない. これを実現させるために, 辺 AD に剛棒を設け, 長方形板の板要素の節点と剛棒の節点を共有させる. 有限要素として, 長方形板と縦補剛材に対して 8 節点シェル要素 (MARC における要素番号 22), 剛棒に対して 3 次元弾性梁要素 (MARC における要素番号 52) を使用する. 3 次元弾性梁要素の伸び剛性とねじり剛性をゼロ, 曲げ剛性に大きな値を設定することにより, 剛棒を実現する. さらに, 中点 M と辺 AD 上の各節点の  $z$  軸回りの回転をタイイングし, 中点 M と辺 AD 上の各節点の  $z$  軸回りの回転角が同じになるようにする. さらに, 縦補剛材の端辺に関しては,  $x$  軸方向と  $y$  軸方向の変位を, それぞれ, 縦補剛材が長方形板の端辺と交差する節点の  $x$  軸方向と  $y$  軸方向の変位と同じになるようにする.

式(3.5)で与えられる局部座屈に対する初期たわみにおいて  $m$  が偶数の場合, 初期たわみ形状が  $x=a/2$  に関して逆対象となるので, 図 3.6(b)に示すように, 解析対象全体を要素分割する. これに対する境界条件を表 3.2(b)に示す. 前述した剛棒を長方形板の両端に設け, 両端に曲げ荷重を与える.



(a) ハーフモデル



(b) フルモデル

図 3.6 解析対象

表 3.2 境界条件

(a) ハーフモデル

	変位			回転角	
	x 方向	y 方向	z 方向	y 軸回り	z 軸回り
点 A	—	固定	固定	—	—
点 M	—	—	固定	—	強制回転
辺 AB 辺 CD 辺 DA	—	—	固定	—	—
辺 BC	固定	—	—	固定	固定

(b) フルモデル

	変位			回転角	
	$x$ 方向	$y$ 方向	$z$ 方向	$y$ 軸回り	$z$ 軸回り
点 A	固定	固定	固定	—	—
点 B	—	固定	固定	—	—
点 M	—	—	固定	—	強制回転
点 N	—	—	固定	—	強制回転
辺 AB 辺 BC 辺 CD 辺 DA	—	—	固定	—	—

要素分割数と解析精度の関係<sup>12)</sup>より，隣接する縦補剛材の間を 10 等分割する．解析を行う長方形板の縦横比に応じて，一要素の  $y$  軸方向の長さに対する， $x$  軸方向の長さが 0.9 から 1.1 の範囲になるように分割する．縦補剛材の幅方向の分割数は 5 とする．

## 第4章 最適断面形状を有する縦補剛された長方形板の耐荷力

### 4.1 初期たわみ形状が耐荷力に及ぼす影響

FEM 解析において，終局曲げモーメント  $M_u$  が，[図 3.6](#) に示す，点 M に生じる反力モーメントが増加しなくなったときの値として与えられ，耐荷力  $\sigma_u$  が次式により算出される．

$$\sigma_u = \frac{M_u}{W} \quad (4.1)$$

$$\text{ここに， } W = \frac{2I}{b} \quad (4.2)$$

$M_u$  : 終局曲げモーメント

$W$  : 縦補剛された長方形板の弾性断面係数

$I$  : 縦補剛された長方形板の断面二次モーメント

縦補剛された長方形板の断面二次モーメント  $I$  は次式で与えられる．

$s$  が 1 または 2 の場合

$$I = \frac{tb^3}{12} + j \left\{ (s-1) \frac{b_r t_r^3}{12} \right\} \quad (4.3)$$

$s$  ( $\geq 3$ ) が奇数の場合

$$I = \frac{tb^3}{12} + j \left\{ (s-1) \frac{b_r t_r^3}{12} + 2b_r t_r \sum_{i=1}^{\frac{s-1}{2}} \left\{ \frac{b}{2s} (2i-1) \right\}^2 \right\} \quad (4.4)$$

$s$  ( $\geq 4$ ) が偶数の場合

$$I = \frac{tb^3}{12} + j \left\{ (s-1) \frac{b_r t_r^3}{12} + 2b_r t_r \sum_{i=1}^{\frac{s-2}{2}} \left( \frac{b}{s} i \right)^2 \right\} \quad (4.5)$$

初期たわみ形状と耐荷力を [表 4.1](#) に示す．これは， $s=3$ ， $R=1.0$ ， $b/t=116.71$ ， $t_r/t=0.844$ （解析対象の寸法を [付録 C](#) に示す）に対する，縦補剛された長方形板の結果である．局部座屈に対する初期たわみの  $x$  軸方向のモード数  $m$  は 4 である．

識別記号 A1 は，縦補剛材が凸の形状を呈する全体座屈に対応する初期たわみ形状であり，識別記号 A2 は，縦補剛材が凹の形状を呈する全体座屈に対応する初期たわみ形状である．両者を比較すると，識別記号 A2 の初期たわみ形状に対する耐荷力が識別記号 A1 のそれより低くなる．

識別記号 B1 と B2 においては，局部座屈に対応する初期たわみ形状が凹凸反対になっているが，両者の初期たわみ形状に対する耐荷力はほぼ等しい．すなわち，局部座屈に対応する初期たわみ形状の凹凸の向きは耐荷力に影響しない．

識別記号 C1～C4 は，全体座屈に対応する初期たわみ形状の凹凸と局部座屈に対応する初期たわみの凹凸を組み合わせた形状である．縦補剛材が凸の形状を示す識別記号 C1 と C2 の耐荷力に比べ，縦補剛材が凹の形状を示す識別記号 C3 と C4 の耐荷力が低い．識別記号 C3 と C4 においては，C3 の初期たわみ形状に対する耐荷力が低くなる．したがって，耐荷力を算出する際の初期たわみ  $w_0$  として次式を採用する．

$$w_0 = -w_{0g} + w_{0l} = -\frac{b}{250} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) + \frac{b_s}{150} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{s\pi y}{b}\right) \quad (4.6)$$

表 4.1 初期たわみ形状と耐荷力

識別記号	$w_0$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
A1	$w_{0g}$	1.082
A2	$-w_{0g}$	1.064
B1	$w_{0l}$	1.017
B2	$-w_{0l}$	1.017
C1	$w_{0g}+w_{0l}$	1.006
C2	$w_{0g}-w_{0l}$	0.988
C3	$-w_{0g}+w_0$	0.964
C4	$-w_{0g}-w_0$	0.976

#### 4.2 最適断面形状に対する耐荷力

2.5 節で与えられた，座屈強度に関する最適断面形状を有する，縦補剛された長方形板の解析結果を図 4.1 に示す．数値データを付録 D に示す．図中の  $s=1$  に対する黒色の曲線は無補剛の長方形板の耐荷力曲線である<sup>5)</sup>．解析値は次式で近似される．

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1.5 & (0.30^* \leq R \leq R_1) \\ 1.5 - 0.7 \frac{R - R_1}{R_2 - R_1} & (R_1 \leq R \leq R_2) \\ 0.8 \left(\frac{R_2}{R}\right)^m & (R_2 \leq R \leq 2.00) \end{cases} \quad (4.7)$$

\* :  $s=1$  に対しては 0

ここに， $R_1$ ， $R_2$ ， $m$  : 表 4.2 に示す値

$s=2$  と 3 に対する耐荷力曲線は  $s=1$  の耐荷力曲線と同じであり， $s=4$  と 5 に対する耐荷力曲線は同じである．

表 4.2  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $m$  の値

$s$	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$R_1$	$R_2$	$m$
1, 2, 3	245	0.34	1.18	0.69
4, 5	245	0.42	1.37	0.94

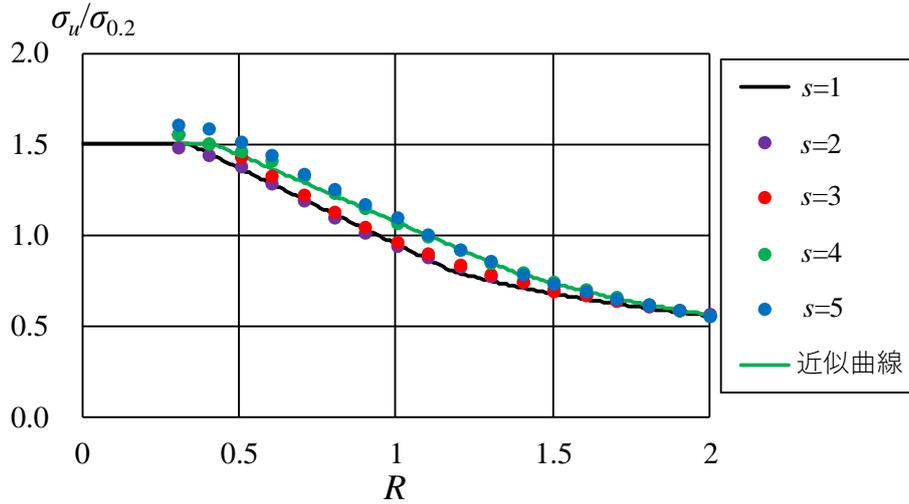


図 4.1  $\sigma_u/\sigma_{0.2}$  と  $R$  の関係

式(2.27), (2.28), (2.31), (2.34), (2.37)の各式を  $R$  について解くことにより次式を得る.  
 $s=1$  に対して,

$$R = \frac{b/t_{em}}{78.56} \quad (0 \leq b/t_{em} \leq 157.12) \quad (4.8)$$

$s=2$  に対して,

$$R = \frac{b/t_{em} + 0.836}{87.905} \quad (25.535 \leq b/t_{em} \leq 174.974) \quad (4.9)$$

$s=3$  に対して,

$$R = \frac{b/t_{em} + 4.223}{112.868} \quad (29.637 \leq b/t_{em} \leq 221.513) \quad (4.10)$$

$s=4$  に対して,

$$R = \frac{b/t_{em} + 11.645}{137.201} \quad (29.515 \leq b/t_{em} \leq 262.757) \quad (4.11)$$

$s=5$  に対して,

$$R = \begin{cases} \frac{b/t_{em} + 11.733}{133.727} & (28.385 \leq b/t_{em} \leq 64.491) \\ \frac{b/t_{em} + 26.41}{159.475} & (64.491 \leq b/t_{em} \leq 292.54) \end{cases} \quad (4.12)$$

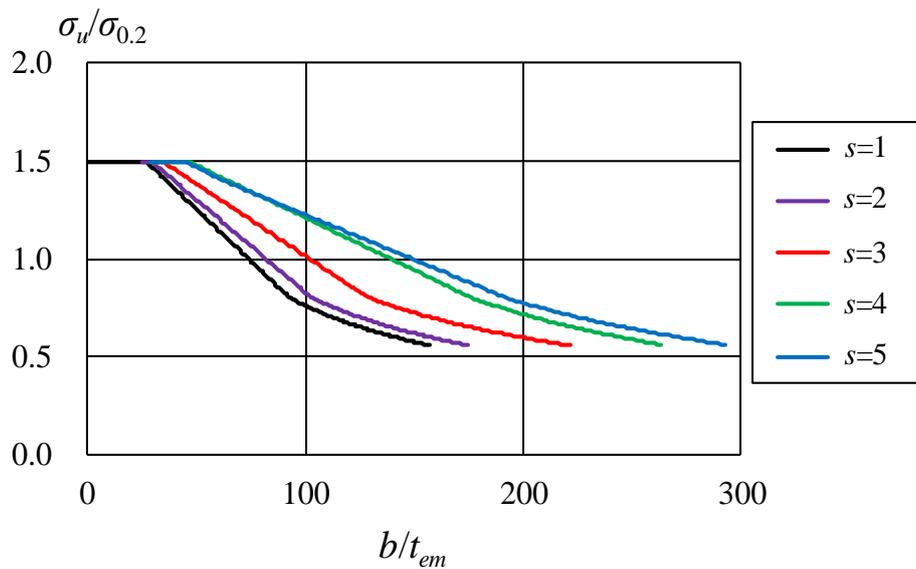


図 4.2  $\sigma_u/\sigma_{0.2}$  と  $b/t_{em}$  の関係

式(4.8)～(4.12)を式(4.7)に代入することにより得られる，耐荷力  $\sigma_u/\sigma_{0.2}$  と，座屈強度に関する最適断面形状に対する幅等価厚比  $b/t_{em}$  の関係を図 4.2 に示す．パネル数  $s$  の増加に伴って耐荷力が増加する． $s=5$  の耐荷力は  $s=4$  の耐荷力に近い．

$b/t_{em}=100$  に対する，座屈強度に関する最適断面形状とそれに対する耐荷力を表 4.4 に示す．耐荷力は式(4.7)によって与えられ，最適断面形状は，式(2.28)～(2.39)で与えられる． $s=5$  の耐荷力は  $s=4$  の耐荷力に対してわずか 1%増加する．縦補剛材の断面積を除いた，長方形板のみの断面積は， $s=5$  の断面積は  $s=4$  の断面積に対して 16%減少する．縦補剛材はせん断力を担わないので，縦補剛材の断面積を含めた総断面積が同じであっても， $s=5$  のせん断強度は  $s=4$  のせん断強度に対して 16%低下する．図 1.2 に示す桁のウェブに，本研究で与えられた，縦補剛された長方形板を適用する場合，桁は曲げモーメントとせん断力を受ける． $s=5$  の最適断面形状は  $s=4$  の最適断面形状に対して，1%の面内曲げ耐荷力の増加に対して，面内せん断耐荷力は 16%低下する．したがって， $s=5$  の最適断面形状は使用しない方がよいと考える．

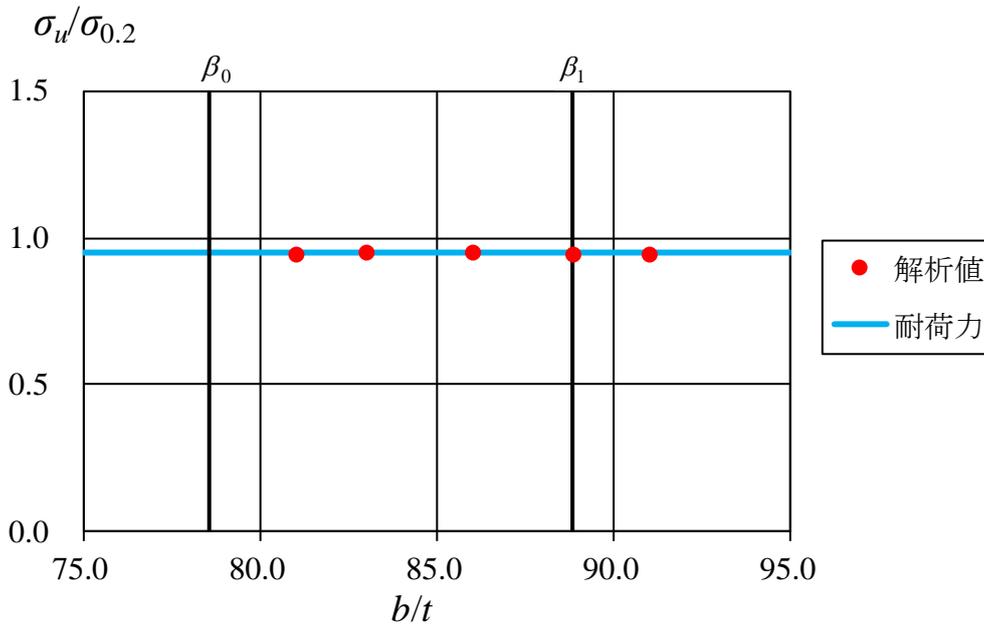
表 4.3 座屈強度に関する最適断面形状と耐荷力

$b/t_{em}$	$s$		
	1	2	3
100			
	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=0.759$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=0.827$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=0.923$
		$s$	
		4	5
	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=1.210$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=1.225$	

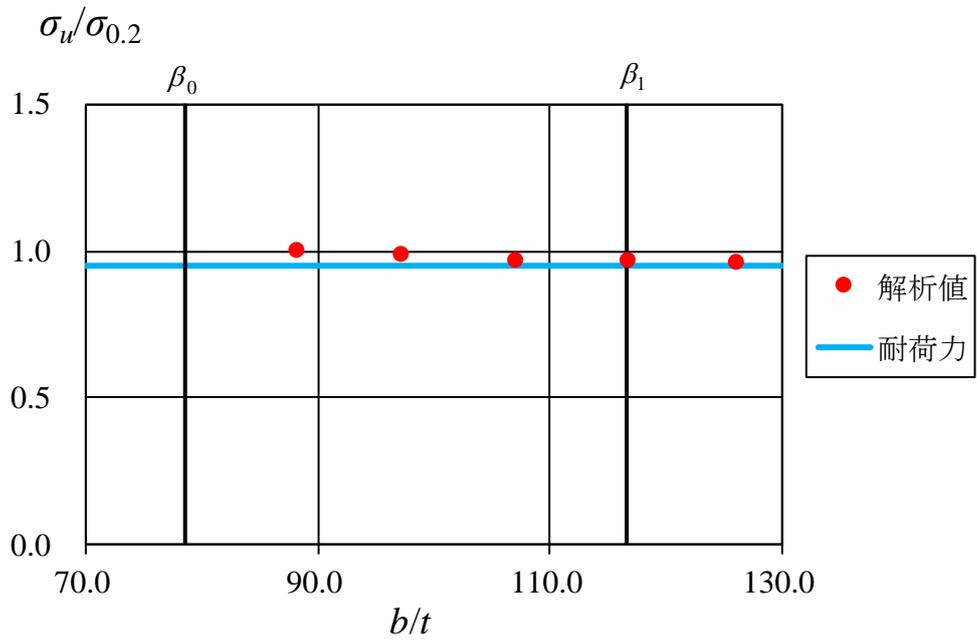
単位 : mm

### 4.3 耐力力と長方形板の幅厚比の関係

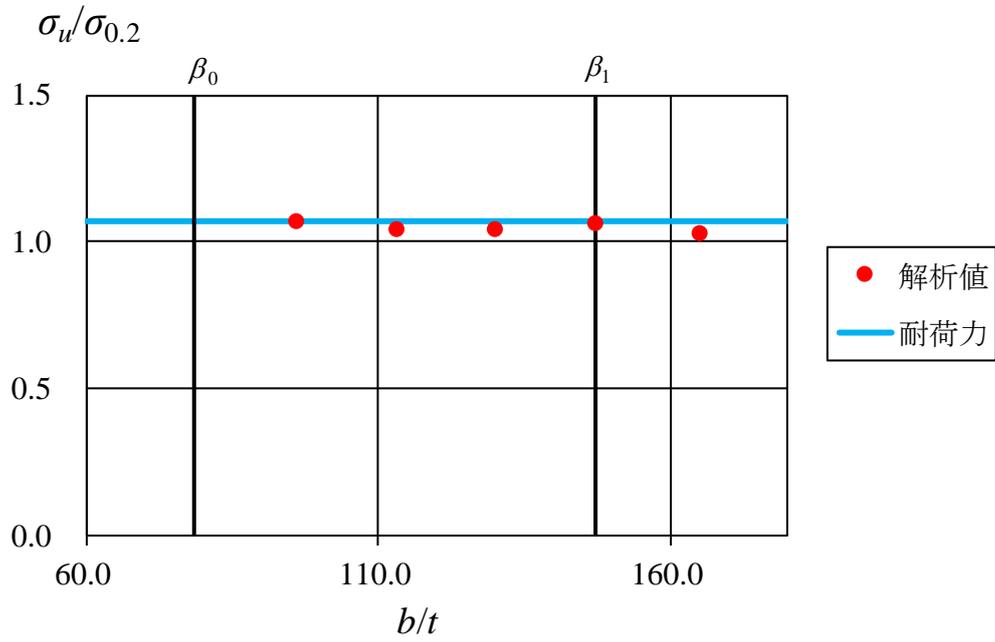
前節では、座屈強度に関する最適断面形状を有する、縦補剛された長方形板に対して耐力力が与えられた。この断面形状が最大の耐力力を与えているか否かを調べる。  $R=1.0$  に対する、縦補剛された長方形板の耐力力と幅厚比の関係を図 4.3、終局時の面外変形を表 4.4 に示す。図 4.3 の解析値は、幅厚比  $b/t$  が式(2.22)の範囲および  $\beta_1$  を超えた値に対して与えられている（数値データを付録 E に示す）。図 4.3 の各図の耐力力は、式(4.7)で与えられ、座屈強度に関する最適断面形状に対するものである。表 4.4 に示すように、終局時の面外変形は、 $b/t$  が  $\beta_0$  に近い場合、全体座屈に似た形状を呈し、 $b/t$  が  $\beta_1$  に近づくと従って、局部座屈に似た形状が生じるが、図 4.3 に示すように、耐力力はほぼ一定である。したがって、座屈強度に関する最適断面形状は、耐力力に関しても、最適な断面形状であると推察される。



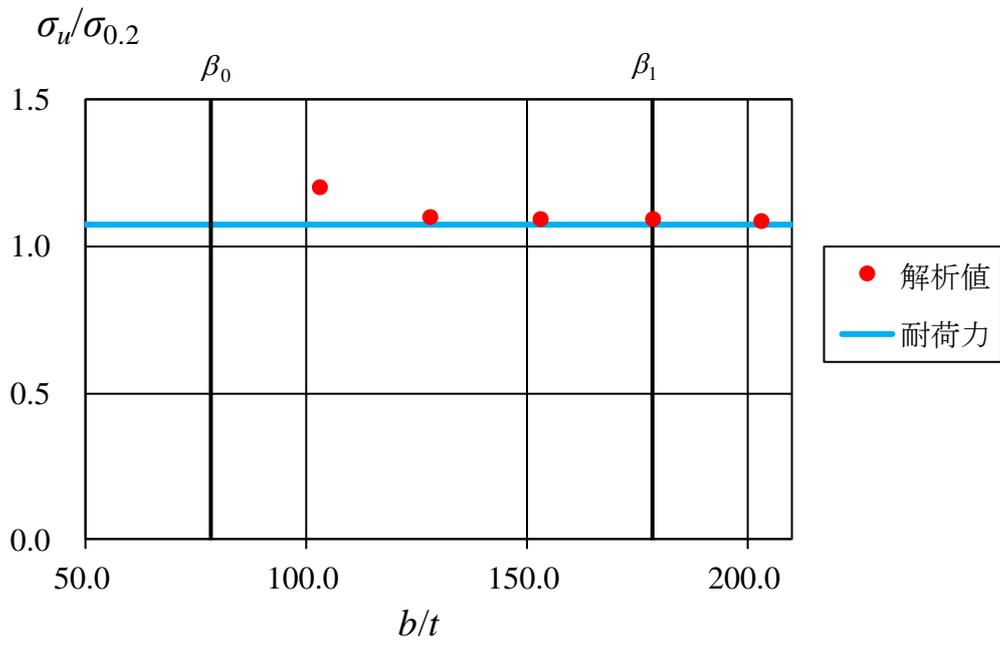
(a)  $s=2$



(b)  $s=3$



(c)  $s=4$

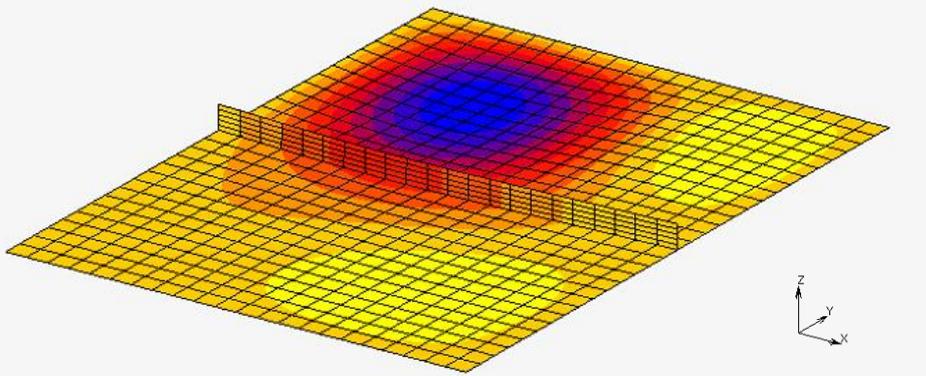
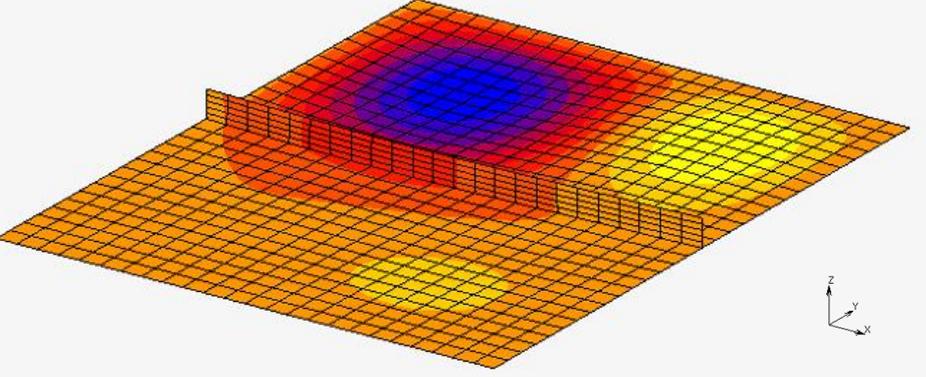
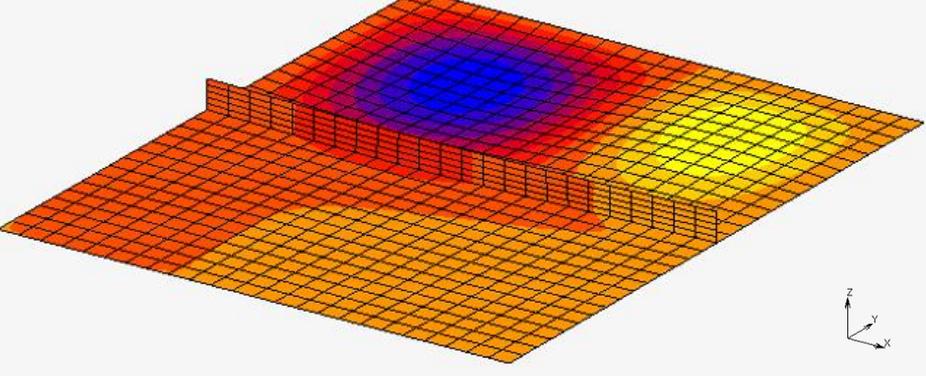


(d)  $s=5$

図 4.3 耐荷力と幅厚比の関係 ( $R=1.0$ )

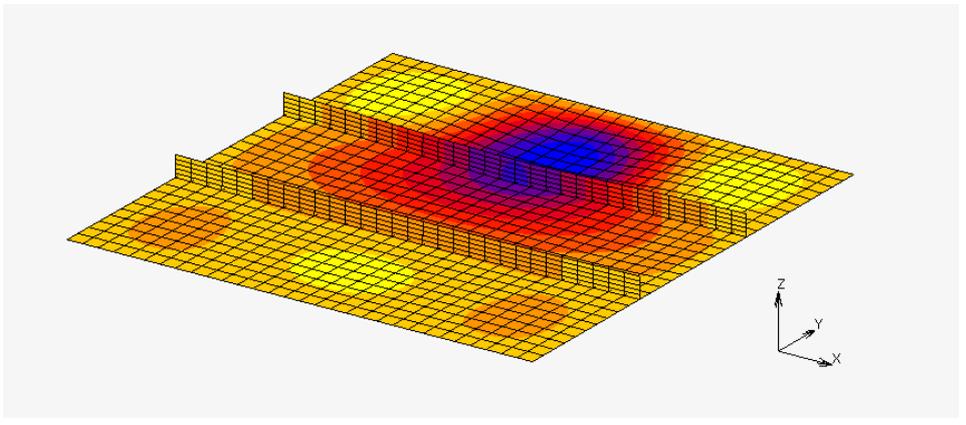
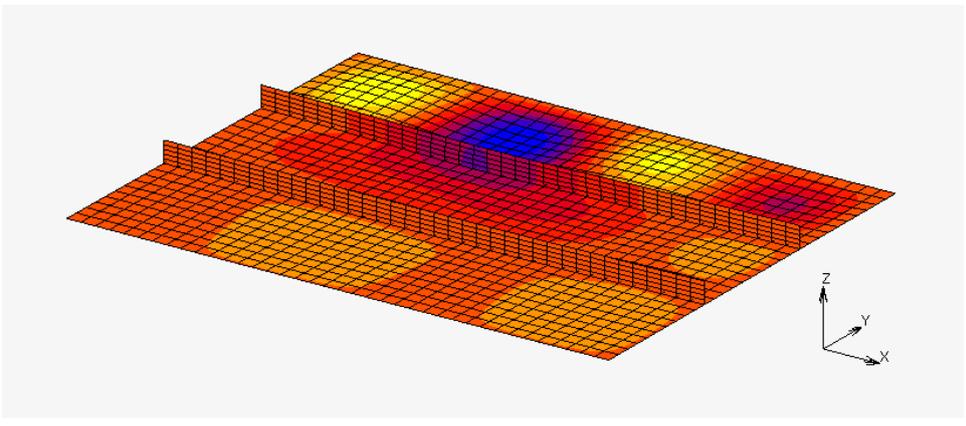
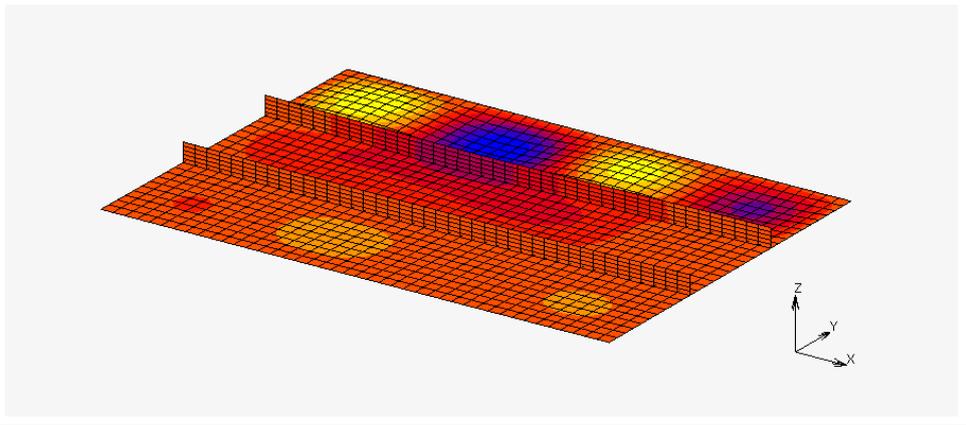
表 4.4 終局時の面外変形

(a)  $s=2$

$bt$	面外変形 (フルモデル)
88.0	
116.71	
126.0	

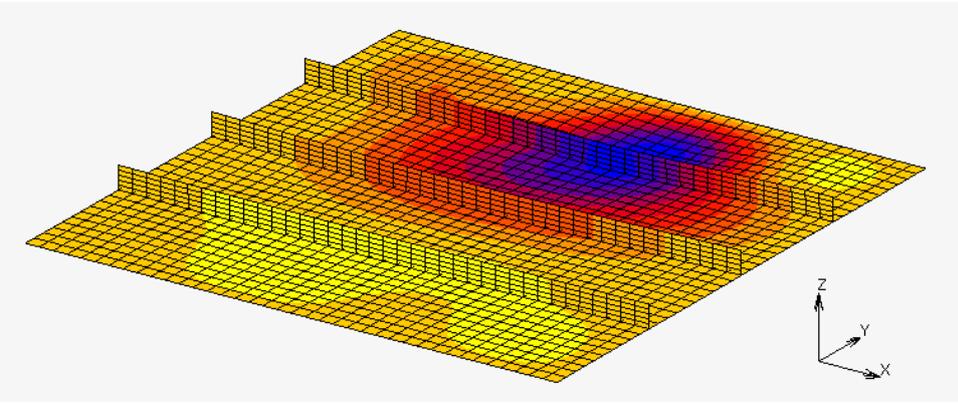
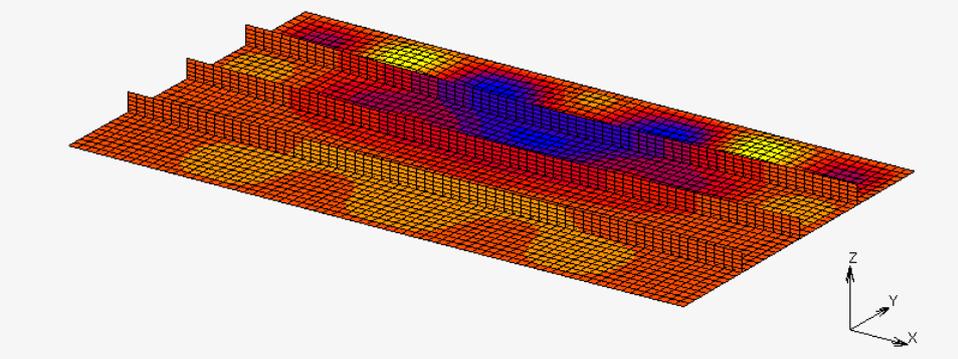
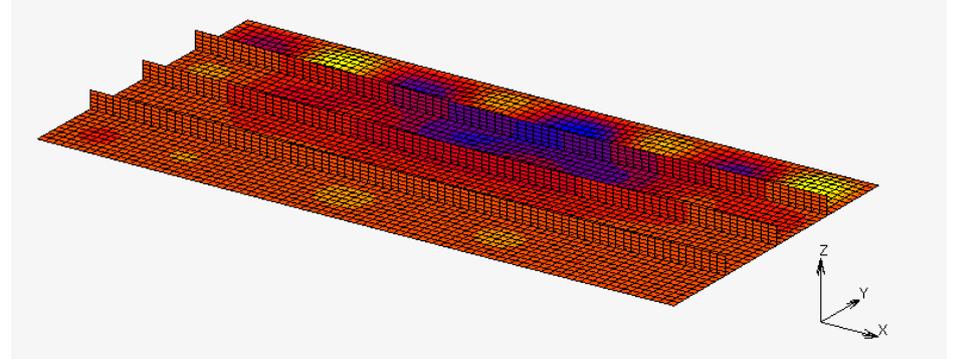
$R=1.0$

(b)  $s=3$

$bt$	面外変形 (フルモデル)
88.0	
116.71	
126.0	

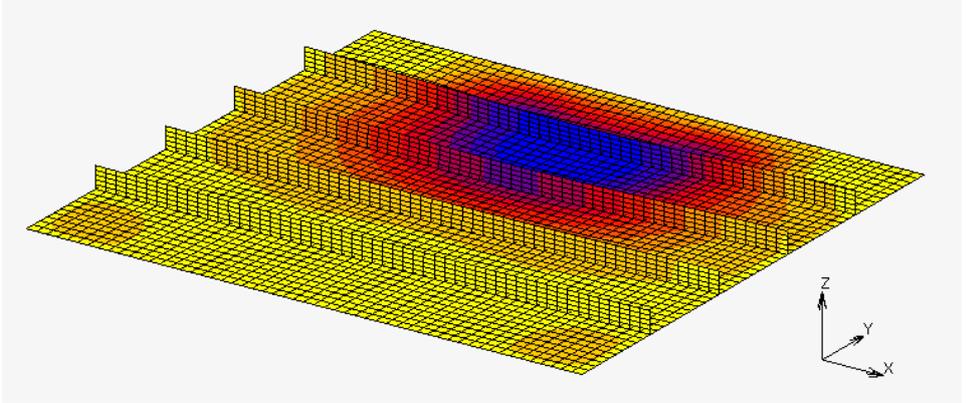
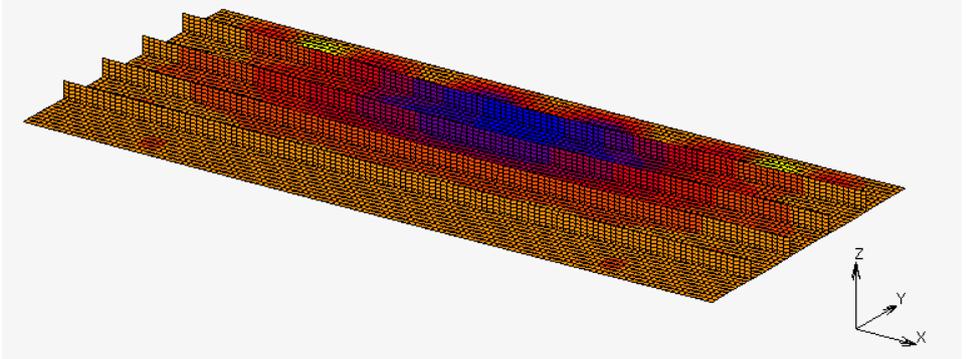
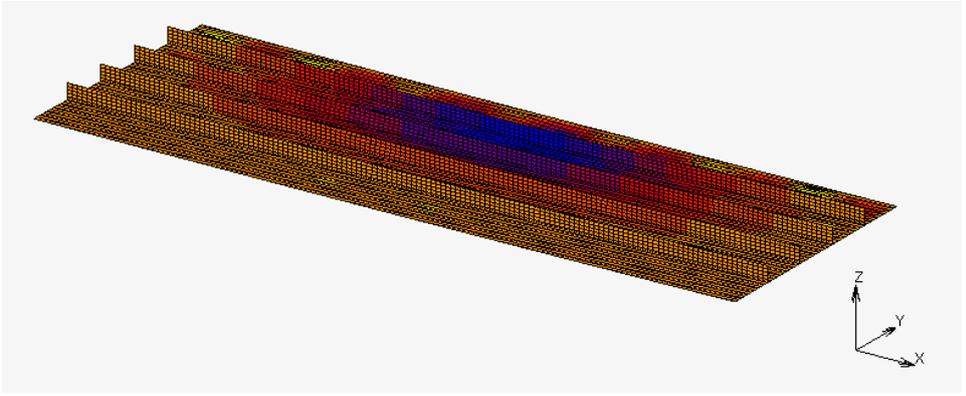
$R=1.0$

(c)  $s=4$

$bt$	面外変形 (フルモデル)
96.0	
147.28	
165.00	

$R=1.0$

(d)  $s=5$

$bt$	面外変形 (フルモデル)
103.0	
178.60	
203.0	

$R=1.0$

## 第 5 章 結論

面内曲げを受ける，縦補剛されたアルミニウム合金板の座屈強度を最大にする断面形状，すなわち最適断面形状を明らかにし，さらに，この最適断面形状を有する，縦補剛されたアルミニウム合金板の耐荷力を，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．考慮したアルミニウム合金は，熱処理アルミニウム合金 A6061-T6 である．主な結論を次に示す．

- (1) 縦補剛材が長方形板と一体となって座屈する場合に対する座屈強度を用いた，板の幅厚比パラメータ [式(2.11)]，および式(5.1)で定義される幅等価厚比を用いて，面内曲げを受ける，縦補剛されたアルミニウム合金板の座屈強度を最大にするような断面形状，すなわち最適断面形状が(2)項の表 5.2 に与えられる．同表に示すように，最適断面形状を規定する  $b/t$  と  $t_r/t$  は，最適断面形状に対する幅等価厚比  $b/t_{em}$  で表される．

$$\frac{b}{t_e} = \frac{b^2}{A} = \frac{(b/t)^2}{b/t + \beta_r j (s-1) (t_r/t)^2} \quad (5.1)$$

ここで，図 5.1 を参照して，式(5.1)の記号の説明は次の通りである．

- $b$  : 長方形板の板幅
- $t_e$  : 等価板厚 ( $=A/b$ )
- $A$  : 縦補剛された長方形板の全断面積
- $t$  : 長方形板の板厚
- $\beta_r$  : 縦補剛材の幅厚比 ( $=b_r/t_r$ )
- $b_r$  : 片側の縦補剛材の板幅
- $t_r$  : 縦補剛材の板厚
- $j$  : 縦補剛材が片側の場合 1，両側の場合 2
- $s$  : パネル数 ( $=b/b_r$ )

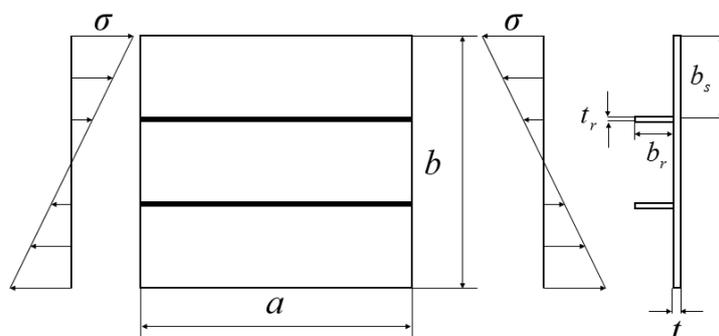


図 5.1 面内曲げを受ける，縦補剛された長方形板

(2) 座屈強度に関する最適断面形状を有する、縦補剛された長方形板の面内曲げ耐荷力が次式で与えられる。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1.5 & (0.30^* \leq R \leq R_1) \\ 1.5 - 0.7 \frac{R - R_1}{R_2 - R_1} & (R_1 \leq R \leq R_2) \\ 0.8 \left(\frac{R_2}{R}\right)^m & (R_2 \leq R \leq 2.00) \end{cases} \quad (5.2)$$

\* :  $s=1$  に対しては 0

ここに,  $R_1, R_2, m$  : 定数 (表 5.1 に示す値)

式(5.2)の  $R$  は, 表 5.2 に示すように, パネル数  $s$  ごとに  $b/t_{em}$  によって与えられる。

表 5.1  $R_1, R_2, m$  の値

$s$	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$R_1$	$R_2$	$m$
1, 2, 3	245	0.34	1.18	0.69
4, 5	245	0.42	1.37	0.94

表 5.2  $R$  と  $b/t_{em}$  の関係および最適断面形状

$s$	$R$ と $b/t_{em}$ の関係	最適断面形状		$b/t_{em}$ の適用範囲
1	$R = \frac{b/t_{em}}{78.56}$	$\frac{b}{t} = \frac{b}{t_{em}}$	—	$0 \leq b/t_{em} \leq 157.12$
2	$R = \frac{b/t_{em} + 0.836}{87.905}$	$\frac{b}{t} = 1.01 \frac{b}{t_{em}} + 0.845$	$\frac{t_r}{t} = 0.18 \left(\frac{b}{t_{em}}\right)^{0.247}$	$25.535 \leq b/t_{em} \leq 174.974$
3	$R = \frac{b/t_{em} + 4.223}{112.868}$	$\frac{b}{t} = 1.034 \frac{b}{t_{em}} + 4.369$	$\frac{t_r}{t} = 0.335 \left(\frac{b}{t_{em}}\right)^{0.198}$	$29.637 \leq b/t_{em} \leq 221.513$
4	$R = \frac{b/t_{em} + 11.645}{137.201}$	$\frac{b}{t} = 1.073 \frac{b}{t_{em}} + 12.512$	$\frac{t_r}{t} = 0.584 \left(\frac{b}{t_{em}}\right)^{0.1484}$	$29.515 \leq b/t_{em} \leq 262.757$
5	$R = \frac{b/t_{em} + 11.733}{133.727}$	$\frac{b}{t} = 1.633 \frac{b}{t_{em}} - 4.125$	$\frac{t_r}{t} = 0.0155 \frac{b}{t_{em}} + 0.495$	$28.385 \leq b/t_{em} \leq 64.491$
	$R = \frac{b/t_{em} + 26.41}{159.475}$	$\frac{b}{t} = 1.118 \frac{b}{t_{em}} + 30.004$	$\frac{t_r}{t} = 0.0012 \frac{b}{t_{em}} + 1.418$	$64.491 \leq b/t_{em} \leq 292.54$

- (3)  $s=5$  の最適断面形状は  $s=4$  の最適断面形状に対して、面内曲げ耐荷力の増加がわずかであるが、面内せん断耐荷力は大きく低下する。したがって、 $s=5$  の最適断面形状は使用しない方がよい。

## 参考文献

- 1) 鋼構造委員会：21世紀の建設材料 アルミニウム合金の可能性，土木学会，平成22年度全国大会研究会討論会，研-06 資料，2010.
- 2) 大倉一郎，長尾隆史，豊田英治：道路橋用アルミニウム床版の開発，橋梁と基礎，建設図書，Vol.50，No.3，pp.26-30，2016.
- 3) 鈴木勝，玉越隆史，沢田道彦：緊急仮設橋の開発について，橋梁と基礎，建設図書，Vol.49，No.11，pp.46-51，2015.
- 4) 大倉一郎，北村幸嗣，赤碓圭輔，卯瀧高久，ビッグ・ラズロ・ゲルグリ，三河克己：新しいアルミニウム合金製補剛桁の提案，構造工学論文集，Vol.51A，pp.203-210，2005.
- 5) 大倉一郎，小笠原康二：接合位置と板幅がアルミニウム合金板の曲げ耐荷力に与える影響，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.68，No.2，pp.287-299，2012.
- 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，構造工学論文集，Vol.62A，pp.93-101，2016.
- 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，土木学会論文集A1，Vol.69，No.3，pp.491-504，2013.
- 8) 山中誠矢，大倉一郎：せん断力を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力，ALST研究レポート，No.49，2017.
- 9) 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，p.199-207，2013.
- 10) DIN 4114 Blatt 1: Stahlbau Stabilitätsfälle (Knickung, Kippung, Beulung), Berechnungsgrundlagen, Vorschriften, 1952.
- 11) 西森文子，大倉一郎：圧縮を受けるアルミニウム合金自由突出板の耐荷力，ALST研究レポート，No.34，2014.
- 12) 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決定法，ALST研究レポート，No.26，2012.
- 13) 土木学会，鋼構造委員会，アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針作成検討小委員会：アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針(案)，2015.
- 14) 鳥畑一博，大倉一郎：曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力，ALST研究レポート，No.42，2016.
- 15) 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.
- 16) MSC. Software Corporation: Marc Mentat 2014.0.0.
- 17) 大倉一郎，佐藤純：摩擦撈拌接合を考慮した突起付きアルミニウム合金板の提案，ALST

研究レポート, No.11, 2009.

付録 A 図 2.6, 2.7, 2.8 の数値データ

(a)  $s=2$

$R$	$b/t$	$t_r/t$	$b/t_{em}$
0.30	26.64	0.401	25.672
0.40	35.53	0.431	34.397
0.50	44.41	0.455	43.141
0.60	53.29	0.477	51.898
0.70	62.17	0.495	60.665
0.80	71.05	0.512	69.440
0.90	79.93	0.528	78.222
1.00	88.81	0.542	87.009
1.10	97.69	0.555	95.800
1.20	106.58	0.567	104.595
1.30	115.46	0.578	113.394
1.40	124.34	0.589	122.196
1.50	133.22	0.599	131.001
1.60	142.10	0.609	139.809
1.70	150.98	0.618	148.618
1.80	159.86	0.627	157.430
1.90	168.75	0.636	166.244
2.00	177.63	0.644	175.059

(b)  $s=3$

$R$	$b/t$	$t_r/t$	$b/t_{em}$
0.30	35.01	0.666	30.206
0.40	46.68	0.702	41.221
0.50	58.35	0.732	52.313
0.60	70.02	0.759	63.460
0.70	81.69	0.784	74.648
0.80	93.36	0.805	85.870
0.90	105.04	0.826	97.118
1.00	116.71	0.844	108.390
1.10	128.38	0.862	119.680
1.20	140.05	0.878	130.988
1.30	151.72	0.894	142.310
1.40	163.39	0.908	153.645
1.50	175.06	0.922	164.992
1.60	186.73	0.935	176.349
1.70	198.40	0.948	187.717
1.80	210.07	0.960	199.092
1.90	221.74	0.972	210.476
2.00	233.41	0.983	221.868

(c)  $s=4$ 

$R$	$b/t$	$t_r/t$	$b/t_{em}$
0.30	44.18	0.999	30.989
0.40	58.91	1.029	44.010
0.50	73.64	1.059	57.225
0.60	88.37	1.087	70.581
0.70	103.10	1.114	84.045
0.80	117.82	1.139	97.594
0.90	132.55	1.162	111.214
1.00	147.28	1.184	124.892
1.10	162.01	1.204	138.622
1.20	176.74	1.224	152.395
1.30	191.46	1.243	166.207
1.40	206.19	1.261	180.053
1.50	220.92	1.278	193.929
1.60	235.65	1.294	207.834
1.70	250.38	1.309	221.763
1.80	265.10	1.325	235.716
1.90	221.74	0.972	210.476
2.00	233.41	0.983	221.868

(d)  $s=5$ 

$R$	$b/t$	$t_r/t$	$b/t_{em}$
0.30	42.92	0.929	28.521
0.40	63.19	1.150	41.423
0.50	85.24	1.352	55.411
0.60	107.16	1.495	70.314
0.70	125.02	1.514	85.604
0.80	142.88	1.534	101.067
0.90	160.74	1.555	116.671
1.00	178.60	1.575	132.395
1.10	196.46	1.595	148.222
1.20	214.32	1.615	164.137
1.30	232.18	1.634	180.131
1.40	250.04	1.653	196.194
1.50	267.91	1.671	212.319
1.60	285.77	1.688	228.501
1.70	303.63	1.705	244.734
1.80	321.49	1.722	261.013
1.90	339.35	1.738	277.335
2.00	357.21	1.754	293.697

(e)  $s=6$

$R$	$b/t$	$t_r/t$	$b/t_{em}$
0.30	39.83	0.790	23.568
0.40	58.74	0.985	31.424
0.50	79.29	1.161	39.280
0.60	101.27	1.326	47.136
0.70	124.52	1.481	54.992
0.80	148.90	1.628	62.848
0.90	174.30	1.770	70.704
1.00	200.72	1.906	78.560
1.10	228.01	2.037	86.416
1.20	252.28	2.104	94.272
1.30	273.31	2.118	102.128
1.40	294.33	2.132	109.984
1.50	315.36	2.146	117.840
1.60	336.38	2.161	125.696
1.70	357.41	2.176	133.552
1.80	378.43	2.191	141.408
1.90	399.45	2.206	149.264
2.00	420.48	2.220	157.120

## 付録 B 圧縮と曲げを受ける長方形板の座屈係数

図2.3に示す，4辺単純支持された $a \times b_s$ の長方形板が $x$ 軸方向に圧縮応力と曲げ応力を受けている場合に対して，その座屈係数の近似値と縦横比の関係を，エネルギー法を適用して求める．

長方形板の座屈後の面外たわみ $w$ を次式で仮定する．

$$w = \sin \frac{m\pi x}{a} \left( B_1 \sin \frac{\pi y}{b_s} + B_2 \sin \frac{2\pi y}{b_s} \right) \quad (\text{B.1})$$

ここに， $B_1, B_2$  : 未定係数

$m$  : 自然数

式(B.1)を用いて，エネルギー法を適用して次式を得る<sup>17)</sup>．

$$B_1^2 \left( \frac{1}{Z} + Z \right)^2 + B_2^2 \left( \frac{1}{Z} + 4Z \right)^2 - k \left\{ \left( 1 - \frac{\varphi_s}{2} \right) (B_1^2 + B_2^2) + \frac{32}{9\pi^2} B_1 B_2 \varphi_s \right\} = 0 \quad (\text{B.2})$$

ここに， $k = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_e}$

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b_s/t)^2} \quad (\text{B.3})$$

$$Z = \frac{1}{m} \frac{a}{b_s} \quad (\text{B.4})$$

$\varphi_s$  :  $a \times b_s$ の板要素の上下縁の応力比

式(B.2)において，未定係数 $B_1, B_2$ は，座屈係数 $k$ が最小となるように決定されなければならない．したがって， $\partial k / \partial B_1 = 0$  および  $\partial k / \partial B_2 = 0$  より次式を得る．

$$B_1 \left\{ \left( \frac{1}{Z} + Z \right)^2 - k \left( 1 - \frac{\varphi_s}{2} \right) \right\} - \frac{16}{9\pi^2} B_2 k \varphi_s = 0 \quad (\text{B.5})$$

$$-\frac{16}{9\pi^2} B_1 k \varphi_s + B_2 \left\{ \left( \frac{1}{Z} + 4Z \right)^2 - k \left( 1 - \frac{\varphi_s}{2} \right) \right\} = 0 \quad (\text{B.6})$$

両者が意味を持つためには，未定係数 $B_1$ と $B_2$ が作る行列式が0にならなければならない条件から次式を得る．

$$\left\{ \left( \frac{1}{Z} + Z \right)^2 - k \left( 1 - \frac{\varphi_s}{2} \right) \right\} \left\{ \left( \frac{1}{Z} + 4Z \right)^2 - k \left( 1 - \frac{\varphi_s}{2} \right) \right\} - \left( \frac{16}{9\pi^2} \varphi_s \right)^2 k^2 = 0 \quad (\text{B.7})$$

この式において， $k$ に関する二つの解のうち，小さい方が座屈係数であり，次式で与えられる．

$$k = \frac{\left(1 - \frac{\varphi_s}{2}\right)(f_{z1} + f_{z2}) - \sqrt{\left(1 - \frac{\varphi_s}{2}\right)(f_{z1} - f_{z2})^2 + \left(\frac{32}{9\pi^2}\varphi_s\right)^2 f_{z1}f_{z2}}}{2\left\{\left(1 - \frac{\varphi_s}{2}\right)^2 - \left(\frac{16}{9\pi^2}\varphi_s\right)^2\right\}} \quad (\text{B.8})$$

ここに,

$$f_{z1} = \left(\frac{1}{Z} + Z\right)^2 = \left(\frac{m}{a/b_s} + \frac{1}{m} \frac{a}{b_s}\right)^2$$

$$f_{z2} = \left(\frac{1}{Z} + 4Z\right)^2 = \left(\frac{m}{a/b_s} + \frac{4}{m} \frac{a}{b_s}\right)^2$$

付録 C 表 4.1 の解析対象の寸法

**s=3, R=1.0**

$b/t$	$b$ (mm)	$t$ (mm)	$t_r/t$	$b_r$ (mm)	$t_r$ (mm)	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$W$ (mm <sup>3</sup> )	$a$ (mm)
116.71	600	5.141	0.844	27.261	4.341	3321.3	316348	756.309

付録D 図4.1の数値データ

(a)  $s=2$

$R$	$b/t$	$b$ (mm)	$t$ (mm)	$t_r/t$	$b_r$ (mm)	$t_r$ (mm)	$a$ (mm)	$m$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
0.30	26.64	600	22.519	0.401	56.69	9.026	479.790	2	1.479
0.40	35.53	600	16.889	0.431	45.68	7.275	479.790	2	1.443
0.50	44.41	600	13.511	0.455	38.64	6.154	479.790	2	1.374
0.60	53.29	600	11.260	0.477	33.71	5.367	479.790	2	1.284
0.70	62.17	600	9.651	0.495	30.03	4.781	479.790	2	1.189
0.80	71.05	600	8.445	0.512	27.16	4.326	479.790	2	1.097
0.90	79.93	600	7.506	0.528	24.87	3.960	479.790	2	1.014
1.00	88.81	600	6.756	0.542	22.98	3.659	479.790	2	0.941
1.10	97.69	600	6.142	0.555	21.39	3.407	479.790	2	0.879
1.20	106.58	600	5.630	0.567	20.04	3.191	479.790	2	0.826
1.30	115.46	600	5.197	0.578	18.87	3.005	479.790	2	0.770
1.40	124.34	600	4.826	0.589	17.85	2.843	479.790	2	0.738
1.50	133.22	600	4.504	0.599	16.95	2.700	479.790	2	0.702
1.60	142.10	600	4.222	0.609	16.15	2.572	479.790	2	0.669
1.70	150.98	600	3.974	0.618	15.43	2.458	479.790	2	0.639
1.80	159.86	600	3.753	0.627	14.79	2.355	479.790	2	0.611
1.90	168.75	600	3.556	0.636	14.20	2.261	479.790	2	0.585
2.00	177.63	600	3.378	0.644	13.66	2.176	479.790	2	0.561

(b)  $s=3$ 

$R$	$b/t$	$b$ (mm)	$t$ (mm)	$t_r/t$	$b_r$ (mm)	$t_r$ (mm)	$a$ (mm)	$m$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
0.30	35.01	600	17.137	0.666	71.67	11.413	802.435	4	1.559
0.40	46.68	600	12.853	0.702	56.64	9.019	787.810	4	1.504
0.50	58.35	600	10.282	0.732	47.29	7.530	778.311	4	1.426
0.60	70.02	600	8.569	0.759	40.86	6.506	771.535	4	1.326
0.70	81.69	600	7.344	0.784	36.14	5.755	766.400	4	1.222
0.80	93.36	600	6.426	0.805	32.51	5.176	762.341	4	1.126
0.90	105.04	600	5.712	0.826	29.62	4.716	759.032	4	1.040
1.00	116.71	600	5.141	0.844	27.26	4.341	756.270	4	0.964
1.10	128.38	600	4.674	0.862	25.29	4.028	753.920	4	0.899
1.20	140.05	600	4.284	0.878	23.63	3.762	751.890	4	0.840
1.30	151.72	600	3.955	0.894	22.19	3.534	750.114	4	0.789
1.40	163.39	600	3.672	0.908	20.95	3.335	748.543	4	0.744
1.50	175.06	600	3.427	0.922	19.85	3.161	747.142	4	0.685
1.60	186.73	600	3.213	0.935	18.88	3.006	745.882	4	0.671
1.70	198.40	600	3.024	0.948	18.01	2.867	744.740	4	0.641
1.80	210.07	600	2.856	0.960	17.23	2.743	743.701	4	0.615
1.90	221.74	600	2.706	0.972	16.52	2.630	742.748	4	0.591
2.00	233.41	600	2.571	0.983	15.87	2.528	741.872	4	0.558

(c)  $s=4$ 

$R$	$b/t$	$b$ (mm)	$t$ (mm)	$t_r/t$	$b_r$ (mm)	$t_r$ (mm)	$a$ (mm)	$m$	$\sigma_{ii}/\sigma_{0.2}$
0.30	44.18	600	13.580	0.999	85.22	13.570	1205.10	8	1.553
0.40	58.91	600	10.185	1.029	65.82	10.480	1155.47	8	1.507
0.50	73.64	600	8.148	1.059	54.18	8.627	1124.96	8	1.465
0.60	88.37	600	6.790	1.087	46.36	7.382	1103.95	7	1.413
0.70	103.10	600	5.820	1.114	40.71	6.482	1088.42	7	1.326
0.80	117.82	600	5.092	1.139	36.41	5.798	1076.38	7	1.234
0.90	132.55	600	4.527	1.162	33.03	5.259	1066.71	7	1.150
1.00	147.28	600	4.074	1.184	30.29	4.823	1058.73	7	1.067
1.10	162.01	600	3.704	1.204	28.01	4.461	1052.02	7	0.989
1.20	176.74	600	3.395	1.224	26.10	4.156	1046.26	7	0.915
1.30	191.46	600	3.134	1.243	24.46	3.894	1041.27	7	0.846
1.40	206.19	600	2.910	1.261	23.03	3.668	1036.88	7	0.799
1.50	220.92	600	2.716	1.278	21.79	3.470	1032.98	7	0.738
1.60	235.65	600	2.546	1.294	20.69	3.294	1029.50	7	0.696
1.70	250.38	600	2.396	1.309	19.71	3.138	1026.36	7	0.657
1.80	265.10	600	2.263	1.325	18.83	2.998	1023.51	7	0.620
1.90	279.83	600	2.144	1.339	18.03	2.871	1020.91	7	0.587
2.00	294.56	600	2.037	1.353	17.31	2.756	1018.52	7	0.557

(d)  $s=5$ 

$R$	$b/t$	$b$ (mm)	$t$ (mm)	$t_r/t$	$b_r$ (mm)	$t_r$ (mm)	$a$ (mm)	$m$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
0.30	42.92	600	13.979	0.929	81.54	12.983	1193.05	10	1.610
0.40	63.19	600	9.495	1.150	68.56	10.917	1339.20	11	1.589
0.50	85.24	600	7.039	1.352	59.74	9.513	1459.92	12	1.514
0.60	107.16	600	5.599	1.495	52.57	8.372	1524.92	12	1.445
0.70	125.02	600	4.799	1.514	45.63	7.265	1485.79	12	1.336
0.80	142.88	600	4.199	1.534	40.46	6.442	1456.37	12	1.250
0.90	160.74	600	3.733	1.555	36.44	5.803	1433.28	12	1.165
1.00	178.60	600	3.359	1.575	33.23	5.292	1414.59	12	1.093
1.10	196.46	600	3.054	1.595	30.60	4.873	1399.08	12	1.002
1.20	214.32	600	2.799	1.615	28.40	4.522	1385.97	12	0.924
1.30	232.18	600	2.584	1.634	26.52	4.223	1374.70	11	0.853
1.40	250.04	600	2.400	1.653	24.91	3.966	1364.90	11	0.789
1.50	267.91	600	2.240	1.671	23.50	3.742	1356.27	11	0.733
1.60	285.77	600	2.100	1.688	22.26	3.545	1348.60	11	0.694
1.70	303.63	600	1.976	1.705	21.16	3.370	1341.73	11	0.653
1.80	321.49	600	1.866	1.722	20.18	3.214	1335.53	11	0.615
1.90	339.35	600	1.768	1.738	19.30	3.073	1329.91	11	0.582
2.00	357.21	600	1.680	1.754	18.50	2.945	1324.78	11	0.551

付録 E 図 4.3 の数値データ

(a)  $s=2$

$b/t$	$b$ (mm)	$t$ (mm)	$t_r/t$	$b_r$ (mm)	$t_r$ (mm)	$a$ (mm)	$m$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
81.00	600	7.407	0.346	16.08	2.56	420.36	2	1.000
83.00	600	7.229	0.413	18.74	2.99	436.84	2	0.983
86.00	600	6.977	0.486	21.28	3.39	459.76	2	0.965
88.81	600	6.756	0.542	22.98	3.70	479.79	2	0.964
91.00	600	6.593	0.581	24.04	3.83	494.59	2	0.957

(b)  $s=3$

$b/t$	$b$ (mm)	$t$ (mm)	$t_r/t$	$b_r$ (mm)	$t_r$ (mm)	$a$ (mm)	$m$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
88.00	600	6.818	0.460	19.71	3.14	496.88	3	1.000
97.00	600	6.186	0.592	23.00	3.66	580.19	3	0.983
107.00	600	5.607	0.722	25.43	4.05	670.06	3	0.965
116.71	600	5.141	0.844	27.26	4.34	756.27	4	0.964
126.00	600	4.762	0.961	28.75	4.58	838.78	4	0.957

(c)  $s=4$

$b/t$	$b$ (mm)	$t$ (mm)	$t_r/t$	$b_r$ (mm)	$t_r$ (mm)	$a$ (mm)	$m$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
96.00	600	6.250	0.547	21.45	3.42	577.70	4	1.075
113.00	600	5.310	0.756	25.21	4.01	735.36	5	1.047
130.00	600	4.615	0.963	27.92	4.45	893.40	6	1.049
147.28	600	4.074	1.184	30.29	4.823	1058.73	7	1.067
165.00	600	3.636	1.426	32.56	5.18	1236.36	8	1.031

(d)  $s=5$

$b/t$	$b$ (mm)	$t$ (mm)	$t_r/t$	$b_r$ (mm)	$t_r$ (mm)	$a$ (mm)	$m$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$
103.00	600	5.825	0.606	22.16	3.529	648.20	5	1.197
128.00	600	4.688	0.899	26.47	4.216	885.68	7	1.097
153.00	600	3.922	1.213	29.88	4.758	1135.11	9	1.091
178.60	600	3.359	1.575	33.23	5.292	1414.59	12	1.093
203.00	600	2.956	1.973	36.63	5.833	1714.79	14	1.082