

圧縮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 48

2017年2月

大阪大学大学院工学研究科

西井智紀, 大倉一郎

概要

本研究では、押出しによって製造される、I型断面および箱型断面のトラス形材を構成する、縦補剛されたアルミニウム合金 A6061-T6 の板要素が圧縮を受ける場合を想定して、両縁支持された、圧縮を受ける、縦補剛された長方形板がある断面積に対して最大の耐荷力を与える断面形状、すなわち最適断面形状を明らかにし、それに対する耐荷力を与える。

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 式(2.16)の適用範囲	・ ・ ・ 6
2.3 縦補剛材の幅厚比	・ ・ ・ 6
2.4 断面積変化率	・ ・ ・ 7
2.5 最適断面形状	・ ・ ・
第 3 章 FEM による弾塑性有限変位解析	・ ・ ・ 15
3.1 解析対象	・ ・ ・ 15
3.2 応力-ひずみ関係	・ ・ ・ 15
3.3 境界条件	・ ・ ・ 15
3.4 要素分割数と耐荷力の精度	・ ・ ・ 19
第 4 章 初期たわみ形状が耐荷力に及ぼす影響	・ ・ ・ 22
4.1 初期たわみ形状	・ ・ ・ 22
4.2 初期たわみ形状と耐荷力	・ ・ ・ 24
4.3 耐荷力と長方形板の幅厚比の関係	・ ・ ・ 26
第 5 章 縦補剛された長方形板の最適断面形状に対する耐荷力	・ ・ ・ 33
第 6 章 結論	・ ・ ・ 38
参考文献	・ ・ ・ 41
付録 A 解析対象の寸法[表 3.3 と 3.4]	・ ・ ・ 42
付録 B 解析対象の寸法[表 4.1]	・ ・ ・ 42
付録 C 解析対象の寸法と解析値[図 4.3]	・ ・ ・ 43
付録 D 解析対象の寸法と解析値[図 4.4]	・ ・ ・ 45
付録 E 解析対象の寸法と解析値[図 5.1]	・ ・ ・ 47
付録 F 数値データ[図 5.2]	・ ・ ・ 49

第1章 序論

アルミニウム合金は軽量で耐食性に優れることから、2000年頃からアルミニウム歩道橋や歩行者用拡幅アルミニウム床版が建設されるようになった¹⁾。2011年には道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋が建設された²⁾。

2015年には国土交通省近畿地方整備局において、南海トラフ巨大地震によって発生する津波によって流失する道路橋対策として緊急仮設橋が製作された。この橋の主構には鋼桁が採用されたが、床版にはアルミニウム合金製の床版が採用された³⁾。緊急仮設橋の主構に対してもアルミニウム合金製トラスを適用することによって、緊急仮設橋をさらに軽量化することができる。

主構がアルミニウム合金製トラスの場合、0.2%耐力が125MPaのアルミニウム合金A5083-Oより、0.2%耐力が245MPaのアルミニウム合金A6061-T6の使用によって部材を軽量化することができる。しかし、A6061-T6は熱処理合金であるため、接合部の強度は母材の0.2%耐力の約半分まで低下する。したがって、A6061-T6をトラス部材に使用する場合には、押出型材に溶接または摩擦攪拌接合を適用することなく、型材のまま使用しなければならない。

圧縮を受けるI型断面および箱型断面のトラス部材を軽量化するためには、図1.1に示すように、縦補剛材を設ける必要がある。しかし、押出ダイスの大きさには制限があり、我が国の会社が所有する押出ダイスの最大寸法は、縦横の長さがともに約300mmである⁴⁾。したがって、押出型材に設けられる縦補剛材の本数は1本または2本である。

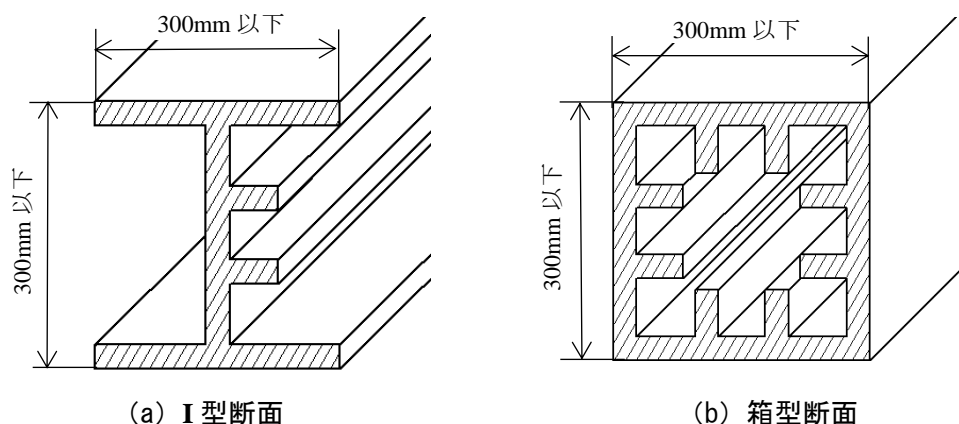



図1.1 アルミニウム合金製トラス型材

押出しでは、任意の断面形状の型材を製造することができる。したがって、縦補剛材を有する押出型材を軽量化するためには、ある断面積に対して最大の耐荷力を与える断面形状、すなわち最適断面形状を明らかにする必要がある。

本研究では、 1.1 に示す I 型断面および箱型断面のトラス形材を構成する、縦補剛された A6061-T6 の板要素が圧縮を受ける場合に対して、その最適断面形状とそれに対する耐荷力を明らかにすることを研究目的とする。

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

前章で述べたように、押出ダイスの最大寸法は、縦横の長さがともに約 300mm であるため、幅の大きい縦補剛材をもつトラス形材の製造は困難になることが多い。したがって、幅の小さい縦補剛材をもつトラス形材が圧縮を受ける場合を想定する。縦補剛材の幅が小さい場合、その剛性も小さくなるので、縦補剛材と長方形板は一体となって全体座屈する。この場合、**図 2.1** を参照して、圧縮を受ける、縦補剛された長方形板の幅厚比パラメータは次式で与えられる。

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

- R : 圧縮を受ける、縦補剛された長方形板の幅厚比パラメータ
 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力
 σ_{cr} : 圧縮を受ける、縦補剛された長方形板の座屈強度
 k : 圧縮を受ける、縦補剛された長方形板の座屈係数
 E : ヤング係数
 μ : ポアソン比
 b : 長方形板の板幅
 t : 長方形板の板厚

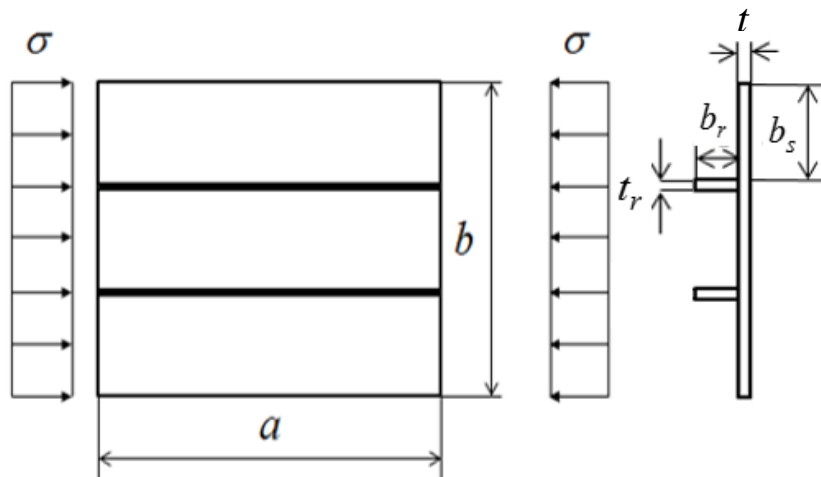


図 2.1 圧縮を受ける、縦補剛された長方形板

圧縮を受ける、縦補剛された長方形板の座屈係数 k は次式で与えられる⁵⁾。

$$k = 2 \frac{1 + \sqrt{1 + s\gamma}}{1 + s\delta} \quad (2.2)$$

ここに, $\gamma = \frac{EI_r}{Db}$ (2.3)

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

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

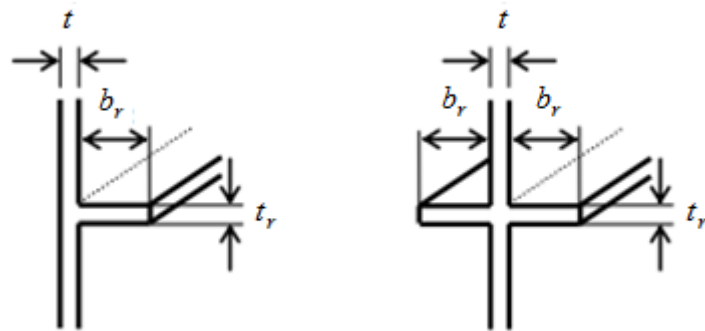
- s : 隣接する縦補剛材で区切られた板要素の総数 ($= b/b_s$)
- b_s : 隣接する縦補剛材で区切られた板要素の幅
- γ : 板の曲げ剛性に対する, 一つの縦補剛材の曲げ剛性の比
- δ : 板の断面積に対する, 一つの縦補剛材の断面積の比
- I_r : 一つの縦補剛材の断面二次モーメント
- A_r : 一つの縦補剛材の断面積
- D : 縦補剛された長方形板の板曲げ剛性

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

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

$$A_r = jt_r b_r \quad (2.7)$$

- ここに, j : 縦補剛が片側の場合 1, 両側の場合 2
 b_r : 縦補剛材の片側の幅
 t_r : 縦補剛材の厚さ



(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
 β_r : 片側の縦補剛材の幅厚比 ($=b_r/t_r$)

式(2.8)と(2.9)を式(2.2)に代入して次式を得る.

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

さらに式(2.10)を式(2.1)に代入して次式を得る.

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{6(1-\mu^2)}{1 + \sqrt{1 + \frac{4(1-\mu^2)js\beta_r^3(t_r/t)^4}{b/t}}} \frac{\sigma_{0.2}}{E} \frac{b}{t}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{js\beta_r(t_r/t)^2}{b/t}}} \quad (2.11)$$

式(2.11)を t_r/t について解いて次式を得る.

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

$$\text{ここに, } H_1 = \frac{4(1-\mu^2)js\beta_r^3}{b/t} \quad (2.13)$$

$$H_2 = \frac{js\beta_r}{b/t} \quad (2.14)$$

$$H_3 = \frac{1}{\pi^2} \frac{6(1-\mu^2)}{R^2} \frac{\sigma_{0.2}}{E} \left(\frac{b}{t} \right)^2 \quad (2.15)$$

さらに, t_r/t は次のように解ける.

$$\frac{t_r}{t} = \sqrt{\frac{H_2 H_3 (H_3 - 1) + \sqrt{H_2^2 H_3^2 + H_1 H_3 (H_3 - 2)}}{H_1 - H_2^2 H_3^2}} \quad (2.16)$$

縦補剛材と長方形板の板厚比 t_r/t は, 長方形板の幅厚比 b/t の関数として表される. 両者の関係を次節の図 2.3 に示す.

2.2 式(2.16)の適用範囲

無補剛の長方形板の座屈応力は次式で与えられる.

$$\sigma_{cr} = 4 \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \frac{1}{\beta_0^2} \quad (2.17)$$

ここに, β_0 : 無補剛の長方形板の幅厚比

他方, 図 2.1 に示す, $a \times b_s$ の板要素が周辺で単純支持されていると仮定すると, 圧縮を受ける $a \times b_s$ の板要素の座屈応力 σ_{cr} は次式で与えられる.

$$\sigma_{cr} = 4 \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \frac{1}{\left(\frac{b_s}{t}\right)^2} = 4s^2 \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{b}{t}\right)^2 \quad (2.18)$$

縦補剛された長方形板が, 縦補剛材と長方形板が一体となって全体座屈する場合の座屈強度が, 縦補剛材で区切られた板要素が局部座屈する場合の座屈強度を超すことはない. したがって, 式(2.17)と式(2.18)を等置して次式を得る.

$$\beta_1 = s\beta_0 \quad (2.19)$$

ここに, β_1 : 縦補剛された長方形板が全体座屈する幅厚比の上限

以上より, 式(2.16)の適用範囲が次式で与えられる.

$$\beta_0 \leq b/t \leq \beta_1 = s\beta_0 \quad (2.20)$$

2.3 縦補剛材の幅厚比

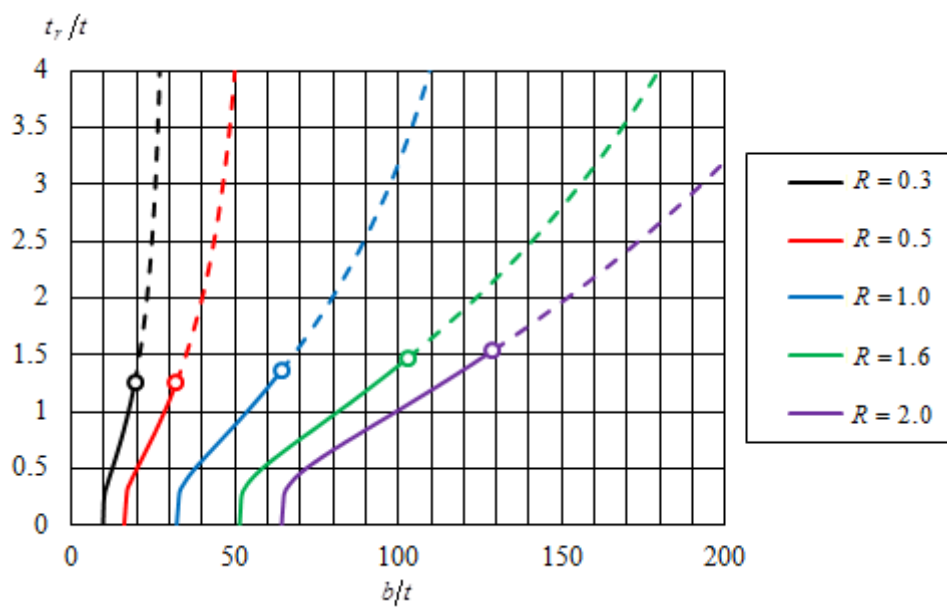
圧縮を受ける自由突出板の耐荷力がアルミニウム合金の0.2%耐力を維持する限界の幅厚比を片側の縦補剛材の幅厚比 β_r に採用する. すなわち,

$$\beta_r = \pi R_{cr} \sqrt{\frac{0.425}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} \quad (2.21)$$

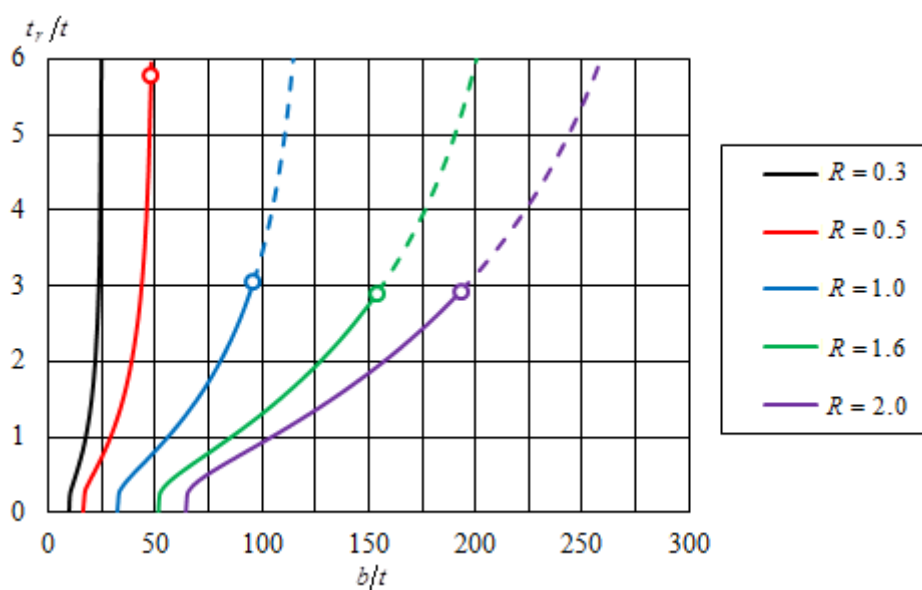
ここに, R_{cr} : 圧縮を受ける自由突出板の耐荷力がアルミニウム合金の0.2%耐力を維持する限界の幅厚比パラメータの値

アルミニウム合金A6061-T6の0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ は245MPaであり, $E=70\text{GPa}$, $\mu=0.3$ である. これらの値と $R_{cr}=0.6^{(6)}$ を式(2.21)に代入して $\beta_r=6.28$ を得る.

$\sigma_{0.2}=245\text{MPa}$, $E=70\text{GPa}$, $\mu=0.3$, $R_{cr}=0.6$ に対して, 式(2.16)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2.3に示す. これは, $j=1$ に対する結果である. 各曲線の破線は, 式(2.16)の適用範囲外であり, 中抜きの丸は β_1 に対応する. 図2.3は, 一つの R の値を満たす t_r/t と b/t の関係が無数に存在することを示している.



(a) $s=2$



(b) $s=3$

図 2.3 t_r/t と b/t の関係

2.4 断面積変化率

無補剛の長方形板の断面積 A_0 と縦補剛された長方形板の断面積 A はそれぞれ次式で与えられる。

$$A_0 = bt_0 \quad (2.22)$$

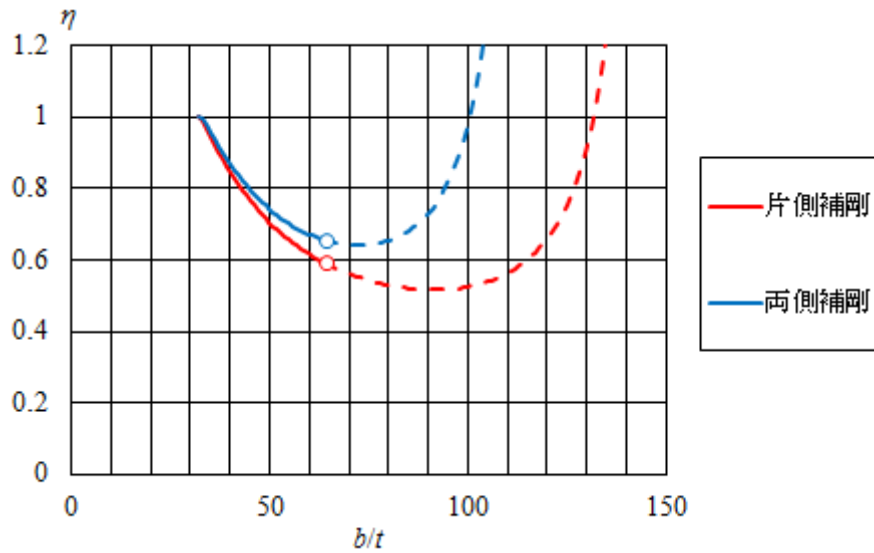
$$A = bt + (s-1)jb_r t_r \quad (2.23)$$

ここに, t_0 : 無補剛の長方形板の板厚 ($=b/\beta_0$)

無補剛の長方形板の断面積に対する, 縦補剛された長方形板の断面積の比, すなわち断面積変化率 η が次式で与えられる.

$$\eta = \frac{A}{A_0} = \frac{bt + (s-1)jb_r t_r}{bt_0} = \frac{\beta_0}{b/t} \left\{ 1 + \frac{(s-1)j\beta_r (t_r/t)^2}{b/t} \right\} \quad (2.24)$$

式(2.16)と(2.24)が与える断面積変化率 η と幅厚比 b/t の関係を片側補剛 ($j=1$) と両側補剛 ($j=2$) に対して図 2.4 に示す. これは $R=1.0$ に対する結果である. 各曲線の破線は, 式(2.24)の適用範囲外であり, 中抜きの丸は β_1 に対応する. 片側補剛の η が両側補剛のそれより低くなるので, 以後片側補剛 ($j=1$) を扱う.



(a) $s=2$

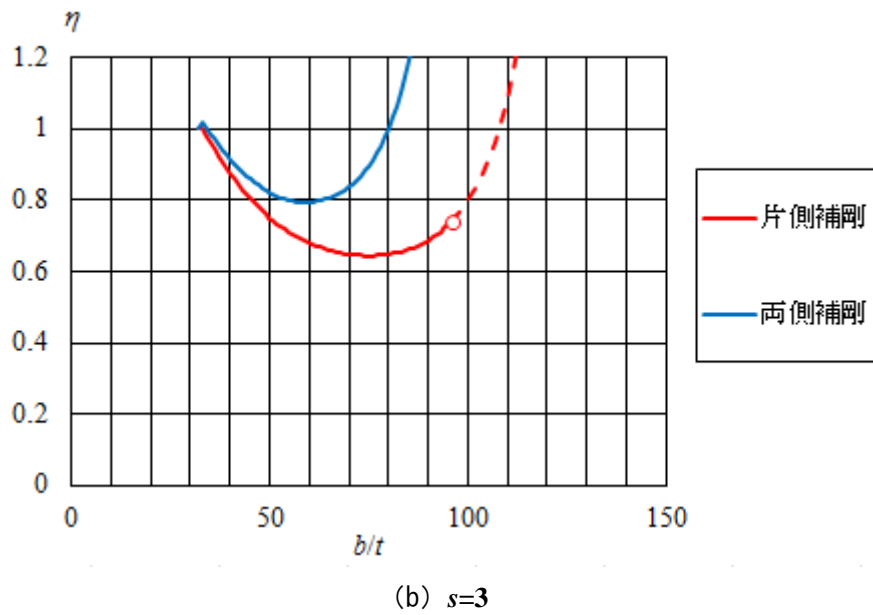
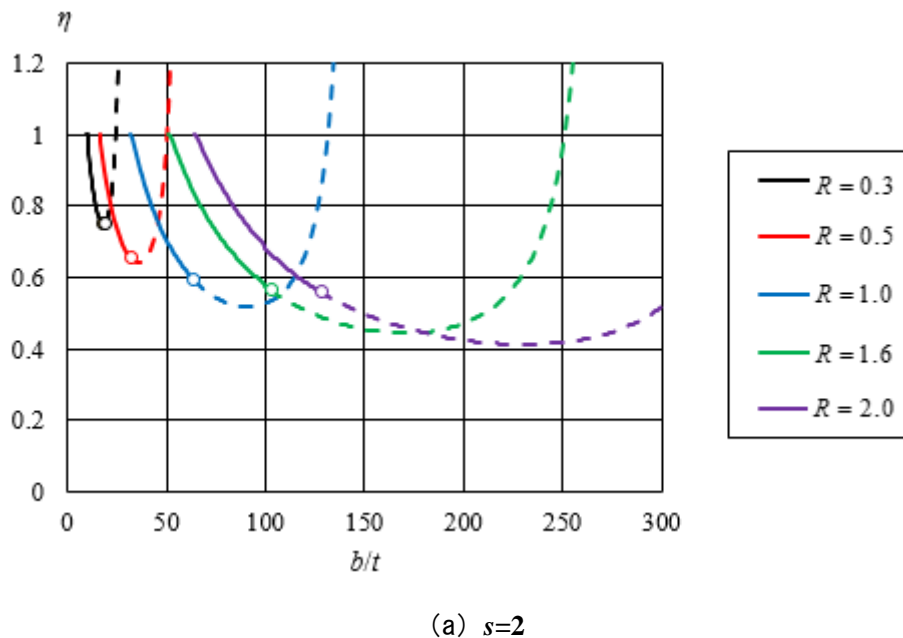
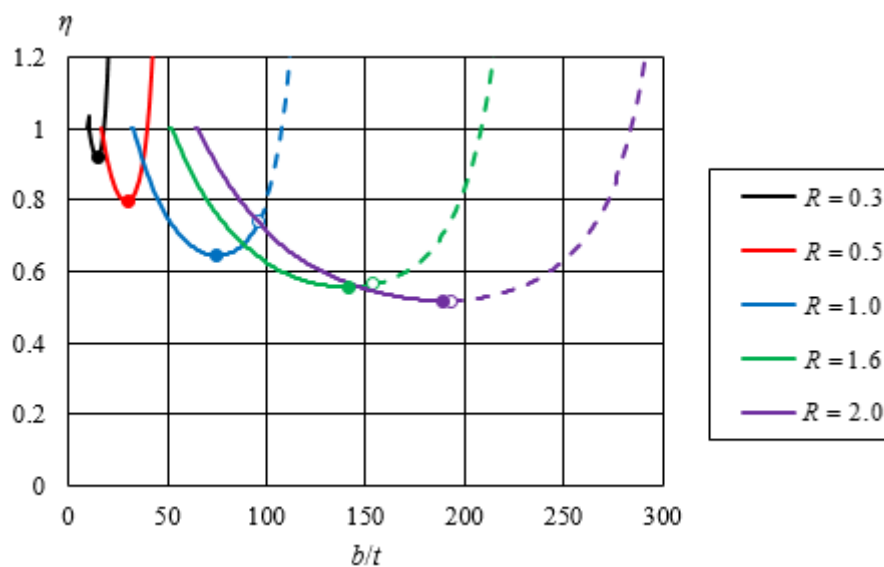


図 2.4 片側補剛と両側補剛に対する断面積変化率 η の比較 ($R=1.0$)

式(2.16)と(2.24)が与える断面積変化率 η と幅厚比 b/t の関係を図 2.5 に示す。各曲線の破線は、式(2.24)の適用範囲外であり、中抜きの丸は β_1 に対応する。図 2.5(a)に示すように、 $s=2$ の場合、中抜きの丸、すなわち β_1 で η は最小となる。他方、図 2.5(b)に示すように、 $s=3$ の場合、 β_1 より小さい、中塗りの丸で η は最小値をとる。





(b) $s=3$

図 2.5 η と b/t の関係

断面積変化率 η が最小値をとるときの、縦補剛された長方形板の幅厚比 b/t と幅厚比パラメータ R の関係を図 2.6 に示す。さらに、この b/t を式(2.16)に代入して得られる縦補剛材と長方形板の板厚比 t_r/t と幅厚比パラメータ R の関係を図 2.7 に示す。図 2.6 と 2.7 の各図のプロット点は計算値であり、これらのプロット点は次式により近似される。

$s=2$ に対して、

$$\frac{b}{t} = 64.28R \quad (2.25)$$

$$\frac{t_r}{t} = 0.178R + 1.18 \quad (2.26)$$

$s=3$ に対して、

$$\frac{b}{t} = 74.98R^{1.34} \quad (2.27)$$

$$\frac{t_r}{t} = 1.73R^{0.723} \quad (2.28)$$

ここに、 $0.3 \leq R \leq 2.0$

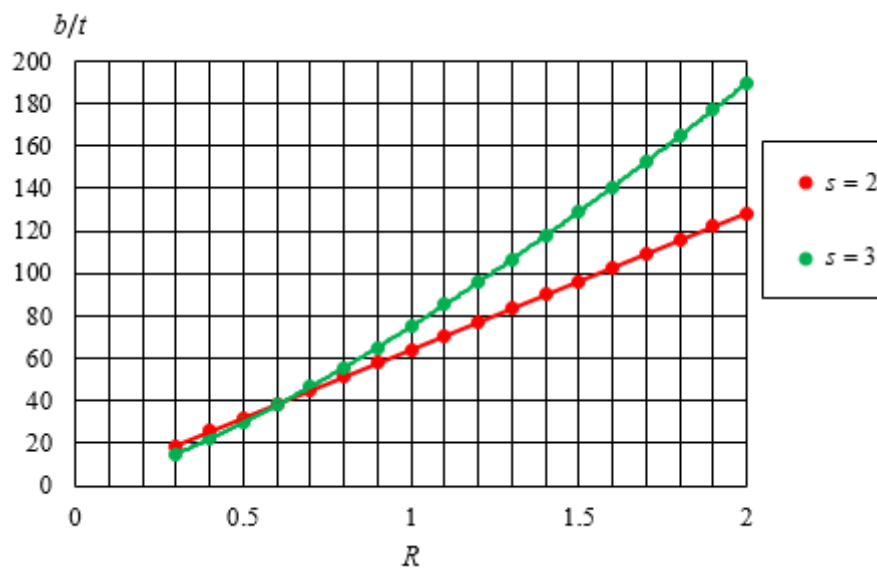


図 2.6 η が最小値をとるときの b/t と R の関係

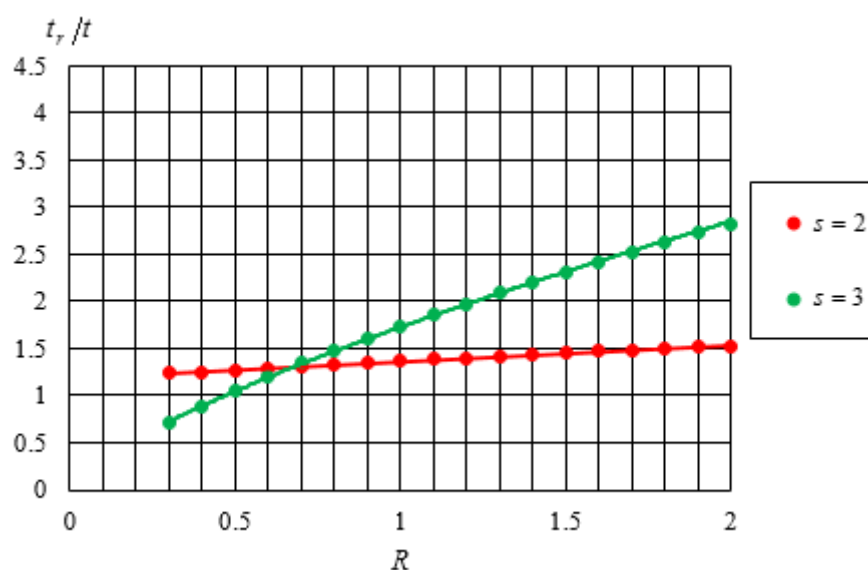


図 2.7 η が最小値をとるときの t_r/t と R の関係

2.5 最適断面形状

次式で定義される幅自乗断面積比について考察する.

$$\frac{b^2}{A} = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)^2}{\frac{b}{t} + \beta_r(s-1)\left(\frac{t_r}{t}\right)^2} = \frac{\left(\frac{b}{t}\right)^2}{\frac{b}{t} + 6.28(s-1)\left(\frac{t_r}{t}\right)^2} \quad (2.29)$$

$s=1$ は無補剛の長方形板を表し, その b^2/A は次式で与えられる.

$$\frac{b^2}{A} = \beta_0 = \pi R \sqrt{\frac{4}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} = 32.14R \quad (2.30)$$

断面積変化率 η が最小値をとるときの b/t と t_r/t を式(2.29)に代入して得られる幅自乗断面積比 b^2/A と幅厚比パラメータ R の関係を図 2.8 に示す. 同図には, 式(2.30)が与える, $s=1$ の無補剛の長方形板に対する関係も描いてある. 同図のプロット点は計算値であり, これらは次式により近似される.

$s=2$ に対して,

$$\frac{b^2}{A} = 60.43R - 5.78 \quad (2.31)$$

$s=3$ に対して,

$$\frac{b^2}{A} = 49.92R^{1.305} \quad (2.32)$$

ここに, $0.3 \leq R \leq 2.0$

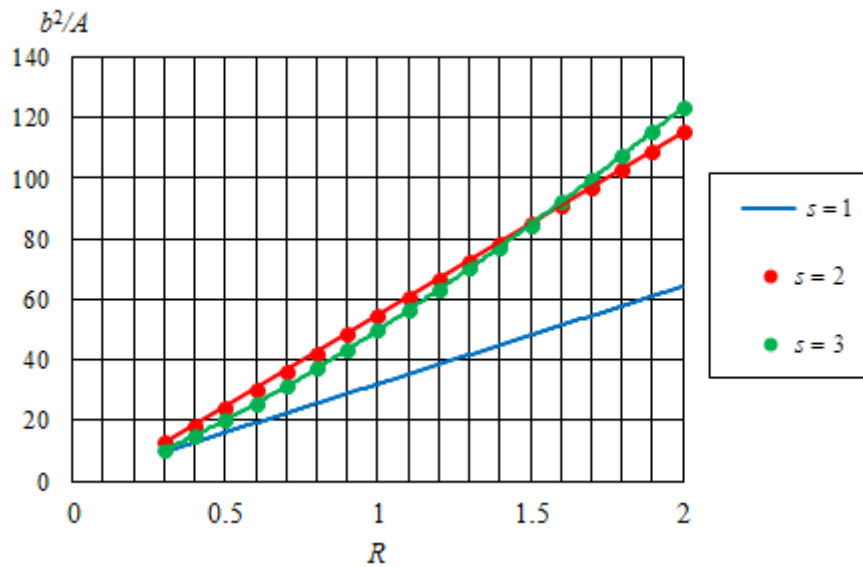


図 2.8 η が最小値をとるときの b^2/A と R の関係

図 2.8 に示すように, R のある値に対して, $s=2$ と 3 の各場合の b^2/A の値は, $s=1$ のそれと比較して最大値を示す. 反対に, b^2/A のある値に対して, $s=2$ と 3 の各場合の R の値は, $s=1$ のそれと比較して最小値を示す. 第 5 章の図 5.2 に示すように, 耐荷力は 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, 耐荷力は最大となる. したがって, $s=2$ と 3 の各場合の b^2/A を与える断面形状が最適断面形状である. 最適断面形状を与える, b/t と b^2/A の関係および t_r/t と b^2/A の関係をそれぞれ図 2.9, 2.10 に示す. これら関係は, 以下の式によって与えられる.

$s=2$ に対して,

$$\frac{b}{t} = 1.0637 \frac{b^2}{A} + 6.148 \quad (2.33)$$

$$\frac{t_r}{t} = 0.002946 \frac{b^2}{A} + 1.197 \quad (2.34)$$

ここに, $12.35 \leq b^2/A \leq 115.08$

$s=3$ に対して,

$$\frac{b}{t} = 1.3525 \left(\frac{b^2}{A} \right)^{1.0268} \quad (2.35)$$

$$\frac{t_r}{t} = 0.1982 \left(\frac{b^2}{A} \right)^{0.554} \quad (2.36)$$

ここに, $10.37 \leq b^2/A \leq 123.34$

式(2.33)は式(2.25)と(2.31)から R を消去し, 式(2.34)は式(2.26)と(2.31)から R を消去して得られる. 他方, 式(2.35)は式(2.27)と(2.32)から R を消去し, 式(2.36)は式(2.28)と(2.32)から R を消去して得られる.

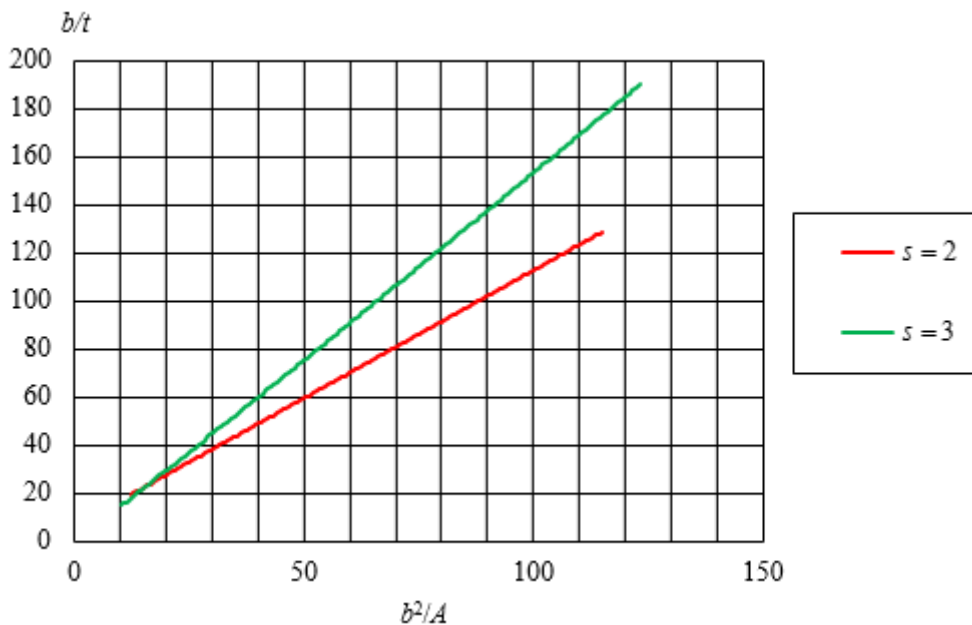


図 2.9 b/t と b^2/A の関係

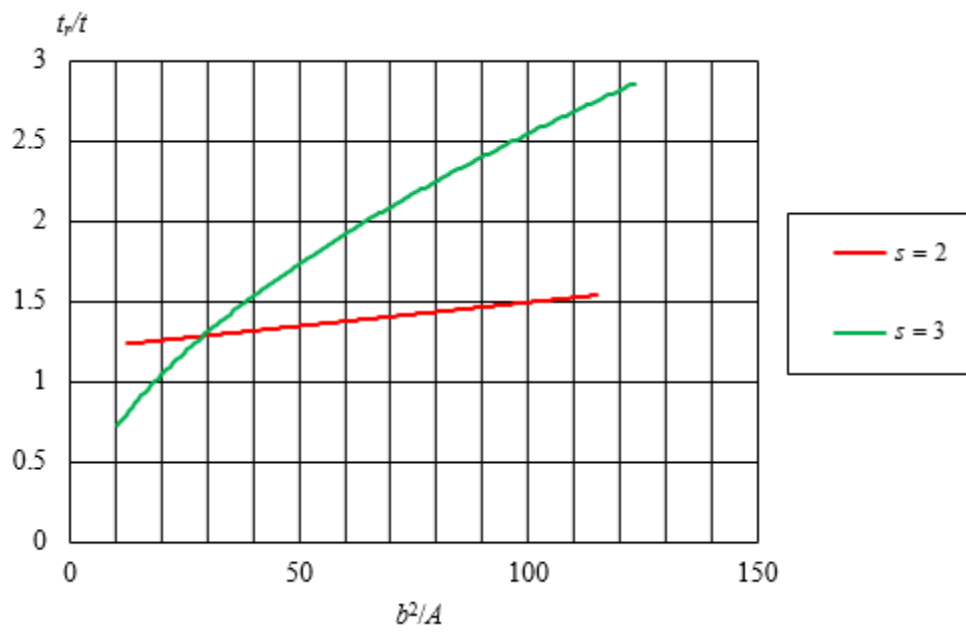


図 2.10 t_p/t と b^2/A の関係

第3章 FEMによる弾塑性有限変位解析

3.1 解析対象

式(2.16)によって与えられる断面形状を有する，縦補剛された長方形板の座屈強度は，式(2.1)が示すように，式(2.20)の範囲で無補剛の長方形板の座屈強度と同じである．しかし，その様な断面形状を有する長方形板の耐荷力が無補剛の長方形板の耐荷力と同じであるか否かは不明である．したがって，FEMによる弾塑性有限変位解析によってそれを明らかにする．解析対象は，図2.1に示す，片側補剛された長方形板である．板幅は $b=300\text{mm}$ ，縦補剛材の幅厚比は $\beta_r=6.28$ である．縦補剛材で区切られた板要素の総数は $s=2$ と 3 である．縦補剛された長方形板の長さは，次式で与えられる座屈波長である⁵⁾．

$$a = b(1 + \gamma s)^{0.25} = b \left\{ 1 + \frac{4(1 - \mu^2) j s \beta_r^3 (t_r / t)^4}{b/t} \right\}^{0.25} \quad (3.1)$$

3.2 応力-ひずみ関係

アルミニウム合金の応力-ひずみ関係に対して，Ramberg-Osgood形式で与えられる，次式を用いる⁷⁾．

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (\sigma \leq \sigma_{0.2}) \quad (3.2)$$

$$\sigma = \sigma_{0.2} \quad (\sigma > \sigma_{0.2}) \quad (3.3)$$

ここに，
 ε : ひずみ
 σ : 応力
 E : ヤング係数 (=70GPa)
 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力
 n : ひずみ硬化パラメータ

アルミニウム合金 A6061-T6 の 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ に対して 245MPa を用い⁸⁾，ひずみ硬化パラメータ n の値に対して 29.1 を用いる．ひずみ硬化パラメータ n の値は，引張試験の結果に対して，非超過確率 5%に対する値である⁷⁾．

3.3 境界条件

4 辺単純支持された，圧縮を受ける縦補剛された長方形板の境界条件を表 3.1 と 3.2 に示す．4.1 節で述べる，局部座屈に対応する初期たわみを与える式(4.2)の m が奇数の場合には $x=a/2$ に対称性の境界条件を与え， m が偶数の場合にはこの対称性の境界条件を設けない．さらに， $s=3$ の場合には， $y=b/2$ に対称性の境界条件を設ける．縦補剛材の端辺上の y 軸方

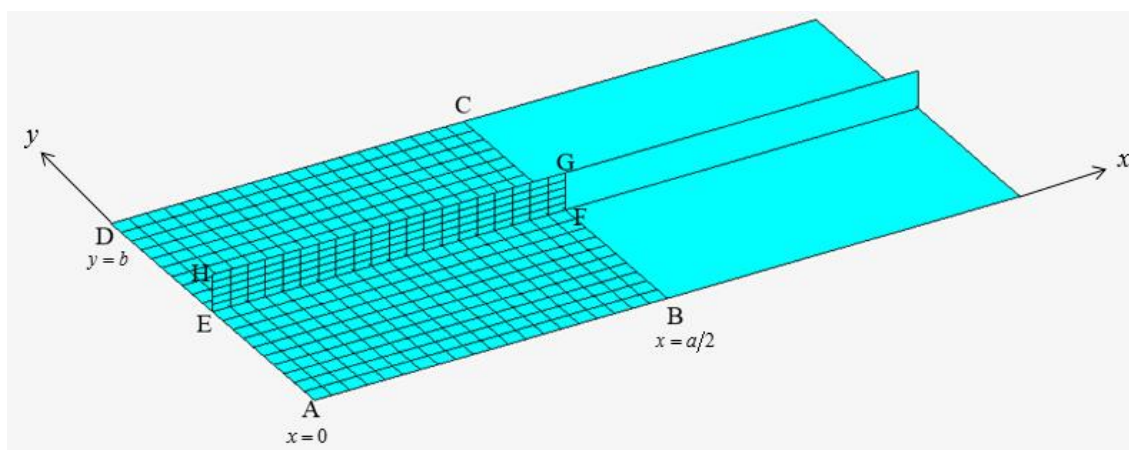
向の変位を, 縦補剛材の端辺が長方形板の端辺と交差する節点の y 軸方向の変位と同一にする. 長方形板の端辺と縦補剛材の端辺を強制変位させることにより圧縮荷重を与える.

表 3.1 境界条件 [式(4.2)の m が奇数の場合]

(a) $s=2$

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
辺 AD	d_x	0	1	0	0	0
辺 EH	d_x	0	0	0	0	0
点 A	0	1	0	0	0	0
辺 BC	1	0	1	0	1	1
辺 FG	1	0	0	0	1	1
辺 AB と辺 CD	0	0	1	0	0	0

(d_x : 強制変位, 0 : 自由, 1 : 拘束)



(b) $s=3$

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
边 AD	d_x	0	1	0	0	0
边 EH	d_x	0	0	0	0	0
点 A	0	1	0	0	0	0
边 BC	1	0	1	0	1	1
边 FG	1	0	0	0	1	1
边 AB	0	0	1	0	0	0
边 CD	0	1	0	1	0	1

(d_x : 強制変位, 0 : 自由, 1 : 拘束)

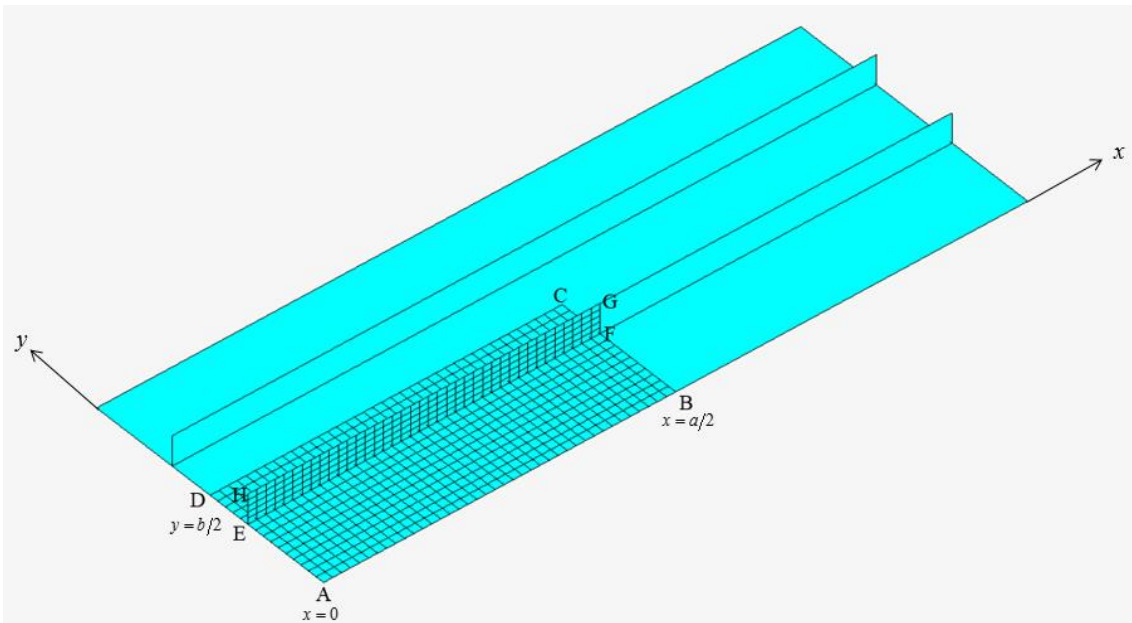
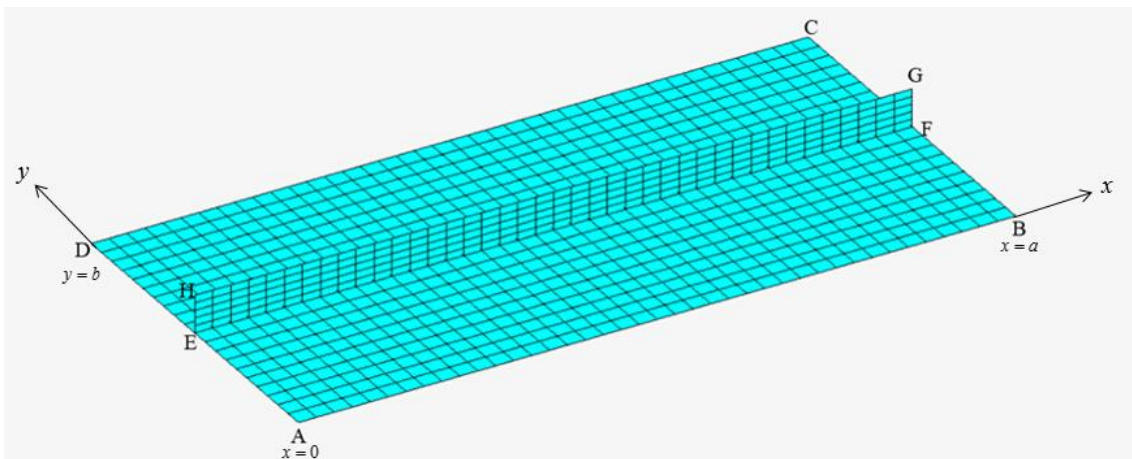


表 3.2 境界条件 [式(4.2)の m が偶数の場合]

(a) $s=2$

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
辺 AD	d_x	0	1	0	0	0
辺 EH	d_x	0	0	0	0	0
辺 BC	$-d_x$	0	1	0	0	0
辺 FG	$-d_x$	0	0	0	0	0
点 A と点 B	0	1	0	0	0	0
辺 AB と辺 CD	0	0	1	0	0	0

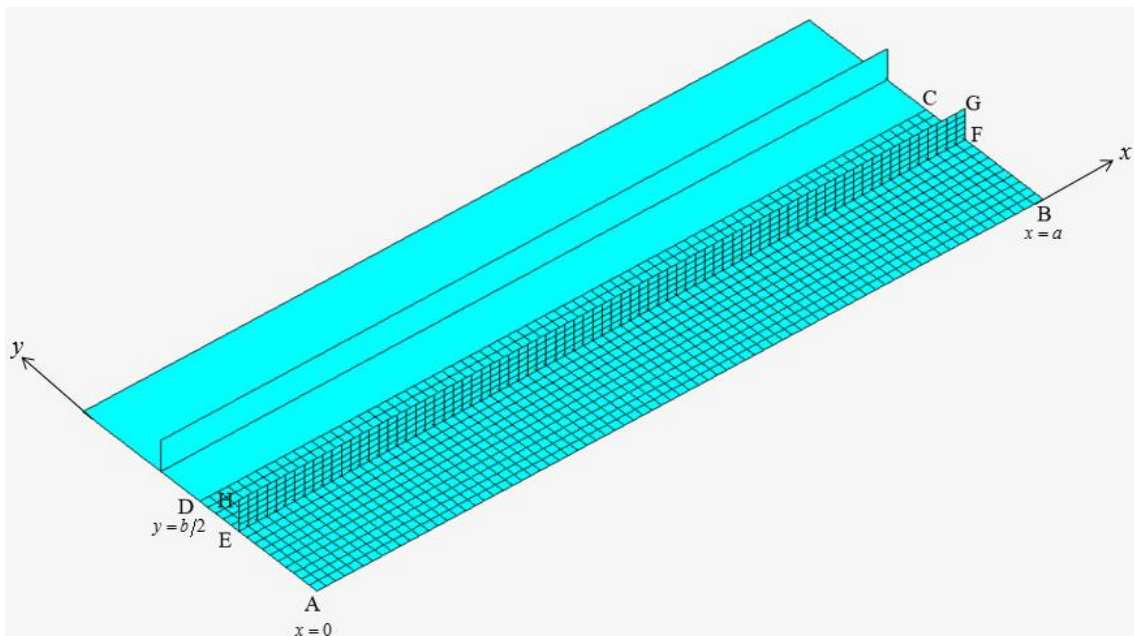
(d_x : 強制変位, 0 : 自由, 1 : 拘束)



(b) $s=3$

	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
辺 AD	d_x	0	1	0	0	0
辺 EH	d_x	0	0	0	0	0
辺 BC	$-d_x$	0	1	0	0	0
辺 FG	$-d_x$	0	0	0	0	0
点 A と点 B	0	1	0	0	0	0
辺 CD	0	1	0	1	0	1

(d_x : 強制変位, 0 : 自由, 1 : 拘束)



3.4 要素分割数と耐荷力の精度

圧縮を受ける，縦補剛された長方形板の弾塑性有限変位解析には汎用有限要素プログラム MARC を用いる⁹⁾．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）を使用する．隣接する縦補剛材間の幅方向の要素分割数と耐荷力の関係を表 3.3 に示す．解析値は， $s=2$ で， $R=0.5, 1.0, 1.6$ の各値に対して， $b/t=\beta_1$ の断面形状を有する，縦補剛された長方形板に対する結果である．解析対象の寸法を付録 A に示す．表 3.3(a) は，4.1 節で述べる，全体座屈に対応する式(4.1)を初期たわみに仮定した場合の結果であり，表 3.3(b) は，局部座屈に対応する式(4.2)を初期たわみに仮定した場合の結果である．表 3.1 と 3.2 の挿入図を参照して，長方形板においては，一つの有限要素の 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 の間になるように分割する．縦補剛材の幅方向の要素分割数は 5 ある．この妥当性については後述する．耐荷力 σ_u は，FEM 解析において，荷重が増加しなくなったとき，載荷辺に生じる反力を断面積で除した値である．表 3.3 から分かるよ

うに、 R の各値に対して解析値はほぼ同じ値を示す。したがって、隣接する縦補剛材間の幅方向の要素分割数を 10 とする。

表 3.3 隣接する縦補剛材間の要素分割数と耐荷力 ($s=2$)

(a) 全体座屈に対応する初期たわみの場合 [式(4.1)]

R	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$		
	隣接する縦補剛材間の幅方向の要素分割数		
	8	10	12
0.5	0.992	0.992	0.992
1.0	0.869	0.869	0.869
1.6	0.583	0.583	0.582

(b) 局部座屈に対応する初期たわみの場合 [式(4.2)]

R	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$		
	隣接する縦補剛材間の幅方向の要素分割数		
	8	10	12
0.5	0.991	0.991	0.991
1.0	0.804	0.804	0.804
1.6	0.561	0.559	0.562

縦補剛材の幅方向の要素分割数と耐荷力の関係を表3.4に示す。解析値は、前述と同様、 $s=2$ で、 $R=0.5, 1.0, 1.6$ の各値に対して $b/t=\beta_1$ の断面形状を有する、縦補剛された長方形板に対する結果である。隣接する縦補剛材間の幅方向の要素分割数は10である。表3.4から分かるように、 R の各値に対して解析値はほぼ同じ値を示すので、縦補剛材の幅方向の要素分割数を5とする。

表 3.4 縦補剛材の幅方向の要素分割数と耐荷力 ($s=2$)

(a) 全体座屈に対応する初期たわみの場合 [式(4.1)]

R	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$		
	縦補剛材の幅方向の要素分割数		
	3	5	7
0.5	0.992	0.992	0.992
1.0	0.869	0.869	0.869
1.6	0.583	0.583	0.583

(b) 局部座屈に対応する初期たわみの場合 [式(4.2)]

R	$\sigma_u/\sigma_{0.2}$		
	縦補剛材の幅方向の要素分割数		
	3	5	7
0.5	0.991	0.991	0.991
1.0	0.804	0.804	0.804
1.6	0.564	0.559	0.560

第4章 初期たわみ形状が耐荷力に及ぼす影響

4.1 初期たわみ形状

圧縮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(2.20)の範囲で、縦補剛材と長方形板が一体となって全体座屈を起こし、 b/t が β_1 を超すと、隣接する縦補剛材で区切られた板要素が局部座屈を起こす。したがって、 b/t が無補剛板の幅厚比 β_0 に近いとき、全体座屈に類似する初期たわみ形状が耐荷力を低下させ、 b/t が β_1 に近づくと局部座屈に類似する初期たわみ形状が耐荷力を低下させることが予測される。そこで、次の二つの初期たわみを考慮する。

全体座屈に対応する初期たわみ

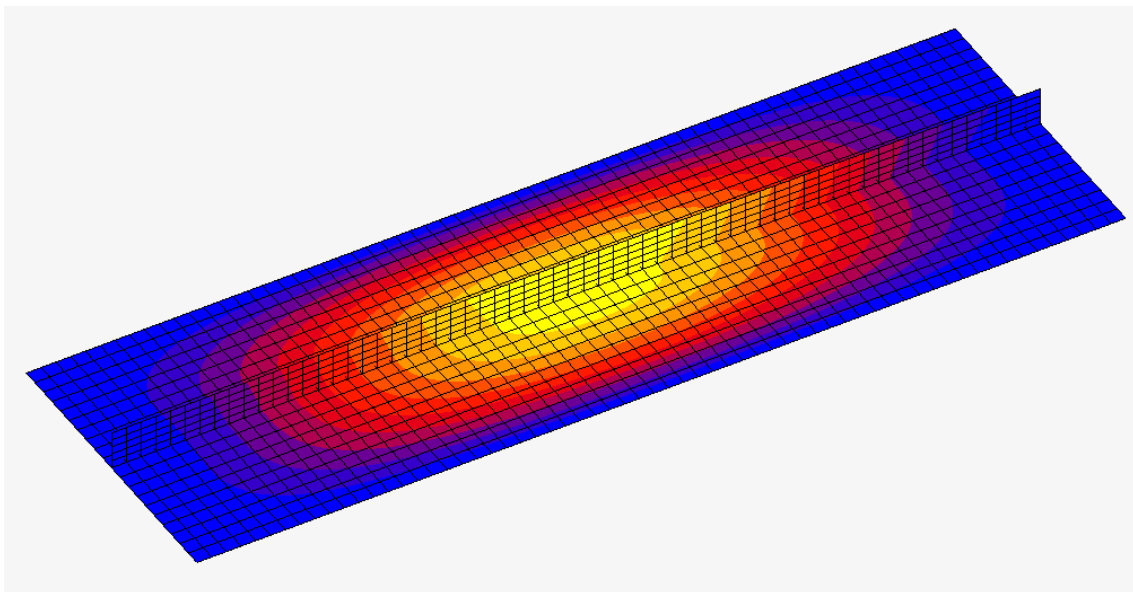
$$w_{0g} = \frac{b}{150} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (4.1)$$

局部座屈に対応する初期たわみ

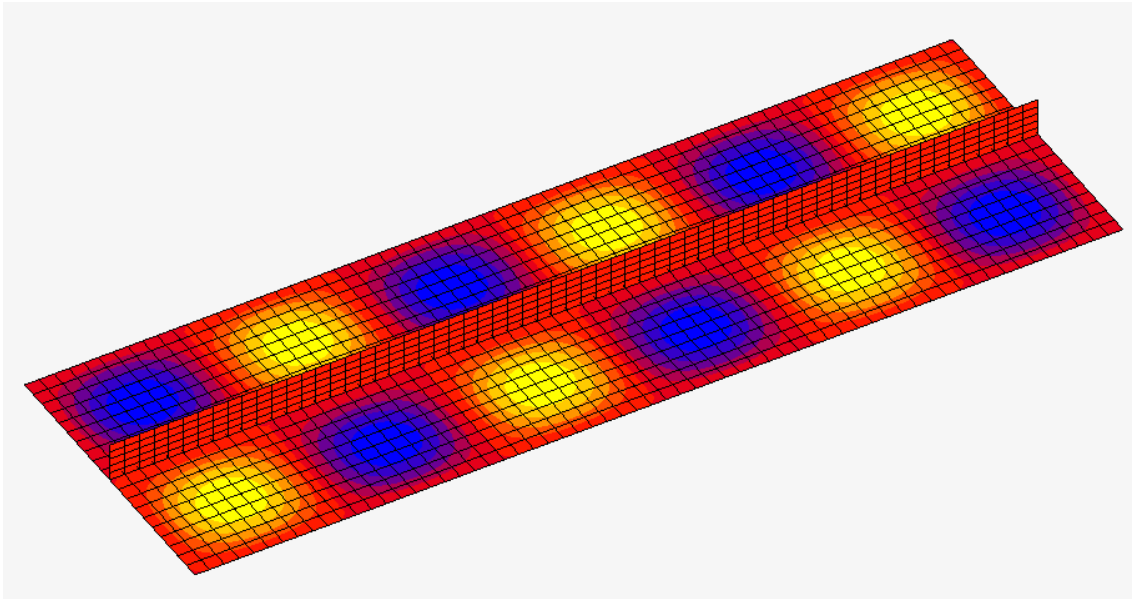
$$w_{0l} = \frac{b}{150s} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{s\pi y}{b}\right) \quad (4.2)$$

ここに、 m ：隣接する縦補剛材で区切られた板要素に与える、初期たわみの x 軸方向のモード数

式(4.1)の最大初期たわみ $b/150$ は、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）¹⁰ で規定される箱桁およびトラスなどのフランジに対する許容製作誤差であり、式(4.2)の最大初期たわみ $b/(150s)$ は、同指針で規定される隣接する縦補剛材間の板要素に対する許容製作誤差である。式(4.1)と(4.2)が与える初期たわみ形状を図4.1に示す。



(a) 全体座屈に対応する初期たわみ形状



(b) 局部座屈に対応する初期たわみ形状

図 4.1 初期たわみ形状 ($s=2$)

隣接する縦補剛材で区切られた板要素の座屈係数 k は次式で与えられる¹⁾.

$$k = \left(m \frac{b}{sa} + \frac{1}{m} \frac{sa}{b} \right)^2 \quad (4.3)$$

ここに、 m ：座屈波形のモード数

式(4.3)が与える k と $a/(b/s)$ の関係を図4.2に示す. 縦横比 $a/(b/s)$ と座屈波形のモード数 m の関係が次式で与えられる.

$$\sqrt{(m-1)m} \leq \frac{sa}{b} \leq \sqrt{m(m+1)} \quad (4.4)$$

この式から、 m は次式を満たす自然数である.

$$\frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \left(\frac{sa}{b} \right)^2}}{2} \leq m \leq \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \left(\frac{sa}{b} \right)^2}}{2} \quad (4.5)$$

ここで、 a/b は式(3.1)で与えられる.

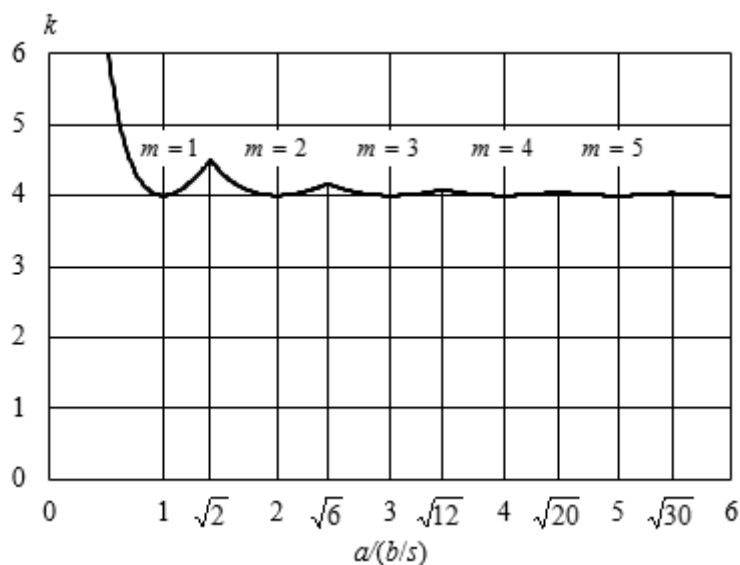


図4.2 座屈係数と縦横比の関係

4.2 初期たわみ形状と耐荷力

初期たわみ形状と耐荷力を表 4.1 に示す。耐荷力は、 $R=1.0$ に対して断面積変化率 η が最小値をとるときの長方形板の幅厚比 [図 2.5(a) を参照して、 $s=2$ に対して $b/t = \beta_1$ ，図 2.5(b) を参照して、 $s=3$ に対して η が最小値をとるときの b/t の値] に対する、縦補剛された長方形板の結果である。解析対象の寸法を付録 B に示す。初期たわみ形状 A1 は、縦補剛材が凸の形状となる、全体座屈に類似する初期たわみ形状であり、初期たわみ形状 A2 は、縦補剛材が凹の形状となる、全体座屈に類似する初期たわみ形状である。 $s=2$ と 3 の各場合において、初期たわみ形状 A2 の初期たわみ形状に対する耐荷力が初期たわみ形状 A1 のそれより低くなる。

初期たわみ形状 B1 と B2 においては、局部座屈に類似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、局部座屈に類似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。

初期たわみ形状 C1～C4 は、全体座屈に類似する初期たわみ形状の凹凸と局部座屈に類似する初期たわみの凹凸を組み合わせた場合である。 $s=2$ と 3 の各場合において、初期たわみ形状 C1 と C2 の耐荷力はほぼ等しく、初期たわみ形状 C3 と C4 の耐荷力はほぼ等しい。そして、初期たわみ形状 C3 と C4 の耐荷力が初期たわみ形状 C1 と C2 の耐荷力より低い。

表 4.1 初期たわみ形状と耐荷力

識別記号	初期たわみ w_0	$\sigma_w/\sigma_{0.2}$	
		$s=2$	$s=3$
A1	w_{0g}	0.869	0.872
A2	$-w_{0g}$	0.828	0.856
B1	w_{0l}	0.804	0.907
B2	$-w_{0l}$	0.804	0.912
C1	$w_{0g} + w_{0l}$	0.776	0.855
C2	$w_{0g} - w_{0l}$	0.776	0.854
C3	$-w_{0g} + w_{0l}$	0.762	0.840
C4	$-w_{0g} - w_{0l}$	0.762	0.840

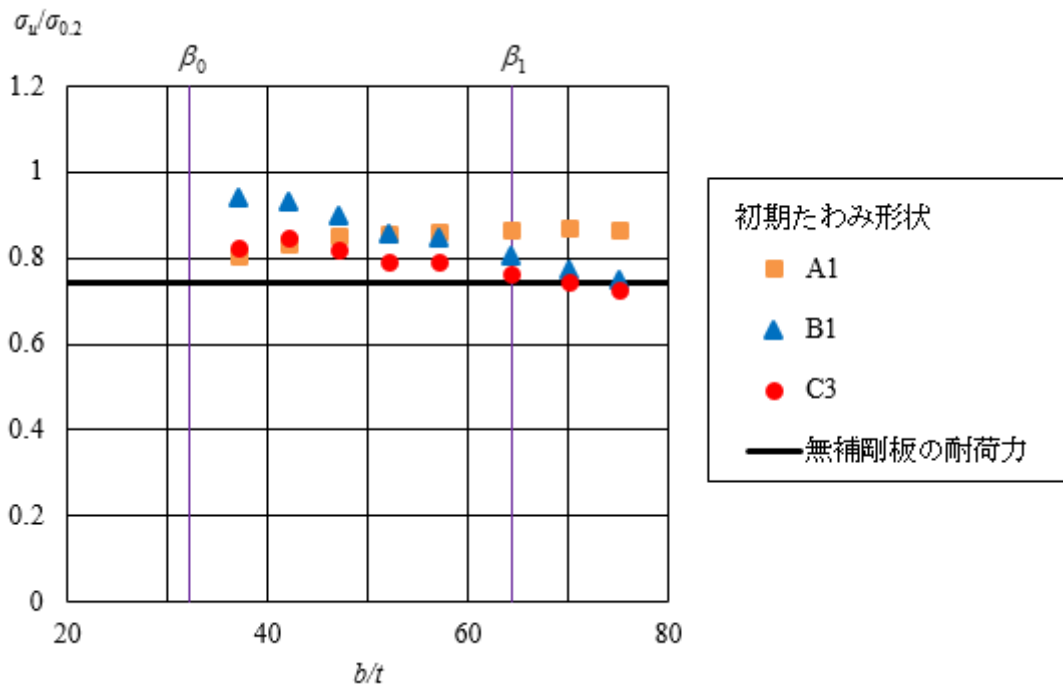
4.3 耐荷力と長方形板の幅厚比の関係

FEM による弾塑性有限変位解析によって得られた、縦補剛された長方形板の耐荷力と長方形板の幅厚比の関係を図 4.3 に示す。これは $R=1.0$ に対する結果であり、初期たわみ形状 A1, B1, C3 が考慮されている。解析対象の寸法と解析値を付録 C に示す。黒色の水平線は、次章で示す、圧縮を受ける無補剛の長方形板の耐荷力を与える式(5.1)において、 $R=1.0$ に対する値である。終局時の面外変形を表 4.3 に示す。各表の左側の列は、 β_0 に近い b/t に対する終局時の面外変形を示し、右側の列は、 β_1 を超える b/t に対する終局時の面外変形を示している。

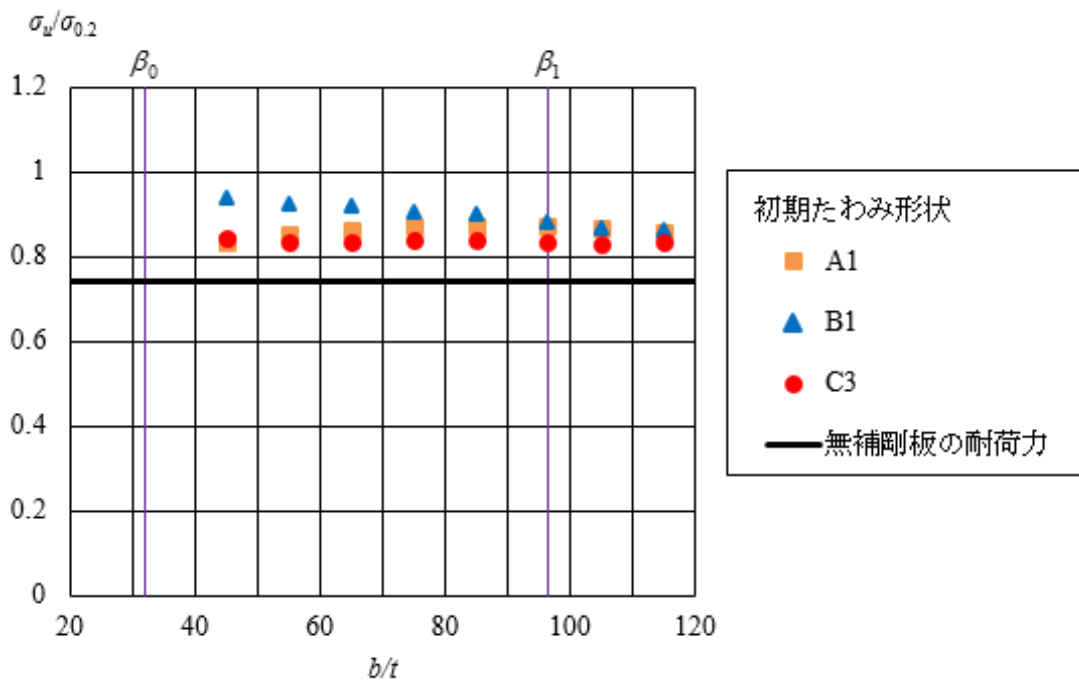
図 4.3 から分かるように、 $s=2$ と 3 の各場合において、 b/t が β_0 に近い場合を除いて、初期たわみ形状 C3 に対する耐荷力が初期たわみ形状 A1 と B1 に対する耐荷力より低い。表 4.3 に示すように、初期たわみ形状 C3 の終局時の面外変形は、 b/t が β_0 に近い場合、全体座屈に対応する面外変形が生じ、 b/t が β_1 を超えると、局部座屈に対応する面外変形が生じる。初期たわみ形状 C3 は、全体座屈に類似する初期たわみ形状と局部座屈に類似する初期たわみ形状をもつため、 b/t が β_0 に近い場合を除いて、この初期たわみ形状に対する耐荷力が他の初期たわみ形状に対する耐荷力より低くなる。

図 4.3 に示すように、 $s=2$ と 3 の各場合において、初期たわみ形状 C3 に対する耐荷力は、 b/t が β_0 と β_1 の間でほぼ一定であり、縦補剛された長方形板の耐荷力が無補剛板の耐荷力より高い。すなわち、式(2.16)によって与えられる断面形状を有する、縦補剛された長方形板の耐荷力は、 b/t が β_0 と β_1 の間で無補剛の長方形板の耐荷力より高くなる。

次に、 $R=2.0$ に対して、縦補剛された長方形板の耐荷力と長方形板の幅厚比の関係および終局時の面外変形をそれぞれ図 4.4、表 4.4 に示す。解析対象の寸法と解析値を付録 D に示す。図 4.4 から分かるように、 $R=2.0$ の場合の初期たわみ形状が耐荷力に及ぼす影響は、 $R=1.0$ の結果に類似する。しかし、 $R=2.0$ の場合、初期たわみ形状 C3 に対する耐荷力は、 b/t が β_0 と β_1 の間で変動は小さいが、 b/t が β_1 に近づくと、縦補剛された長方形板の耐荷力が、無補剛板の耐荷力を表す黒の水平線をわずかに下回るようになる。



(a) $s=2$

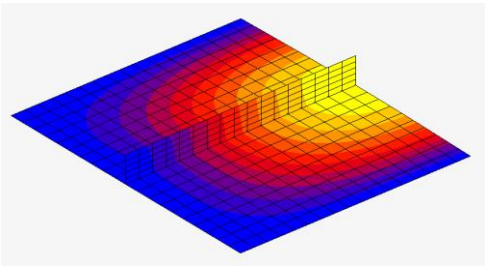
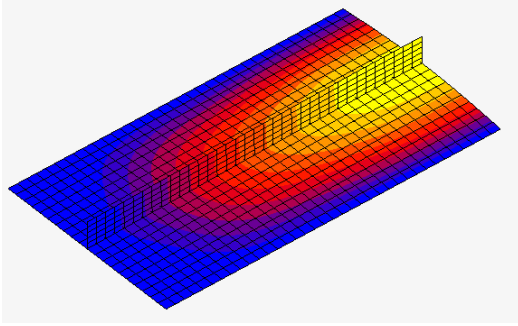
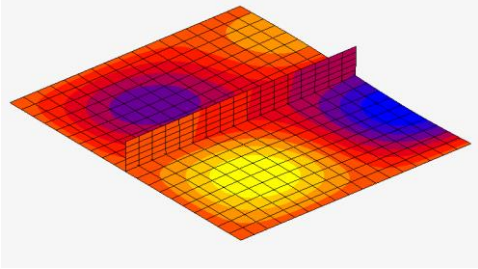
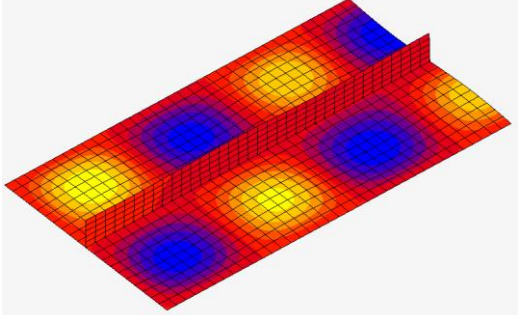
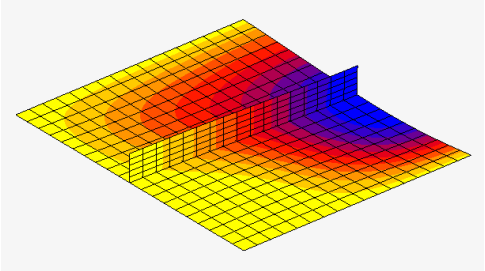
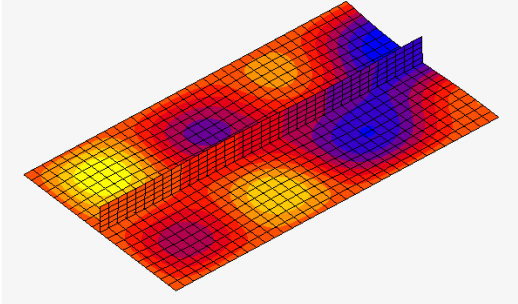


(b) $s=3$

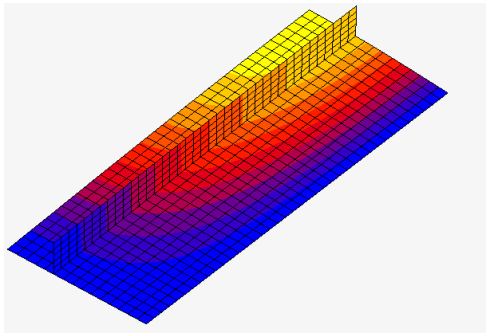
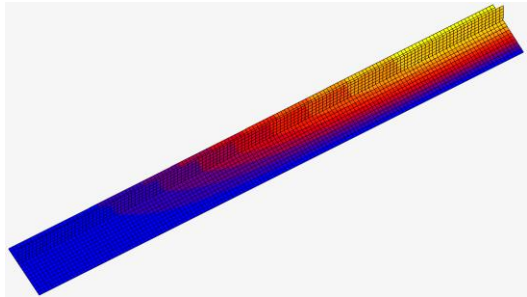
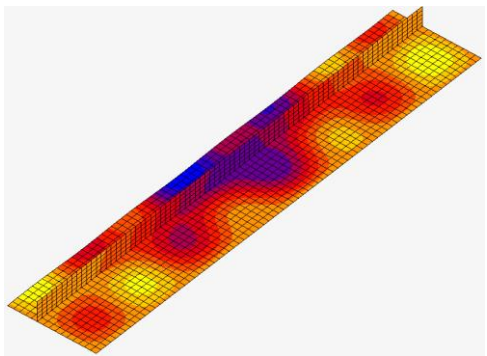
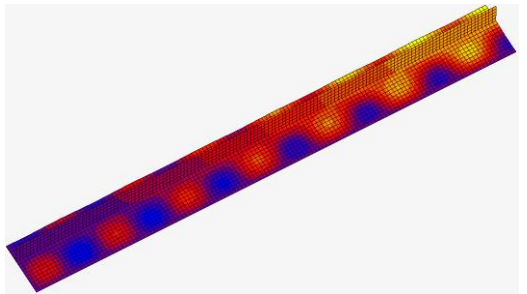
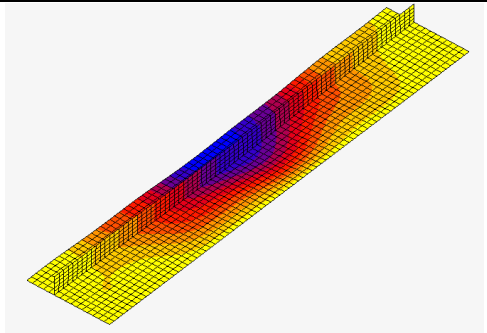
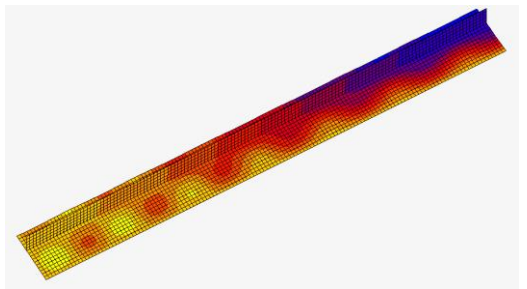
図4.3 耐荷力と長方形板の幅厚比の関係 ($R=1.0$)

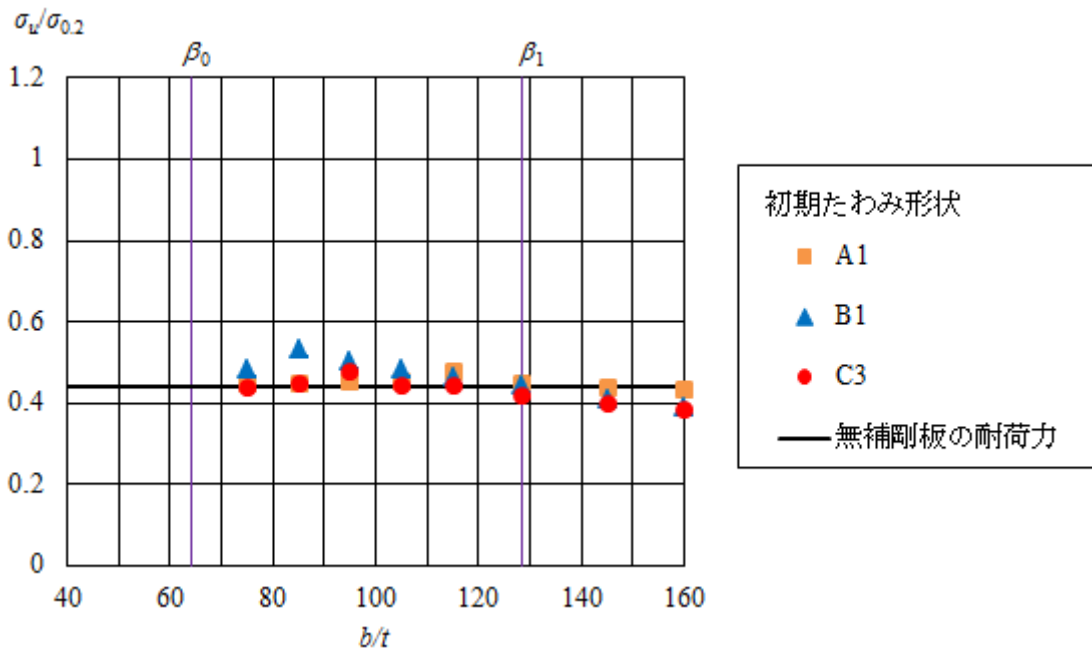
表4.3 終局時の面外変形 ($R=1.0$)

(a) $s=2$

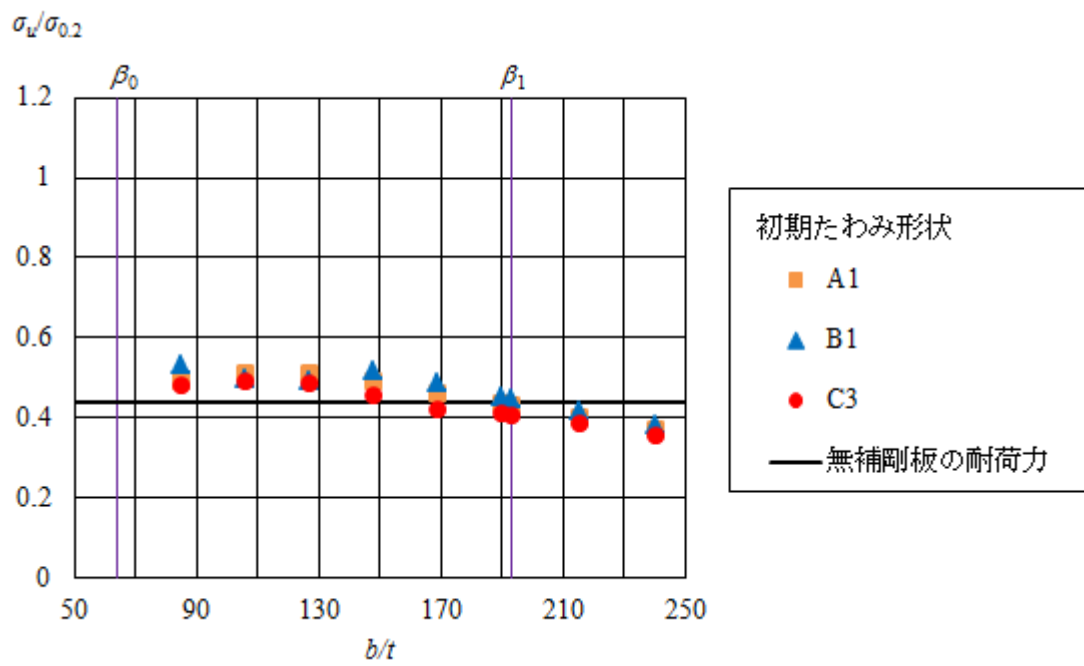
	$b/t=42$	$b/t=70$
A1		
	対称条件あり	対象条件あり
B1		
	対称条件あり	対称条件あり
C3		
	対称条件あり	対称条件あり

(b) $s=3$

	$b/t=55$	$b/t=105$
A1		
	対称条件あり	対称条件あり
B1		
	対称条件なし	対称条件あり
C3		
	対称条件なし	対称条件あり



(a) $s=2$

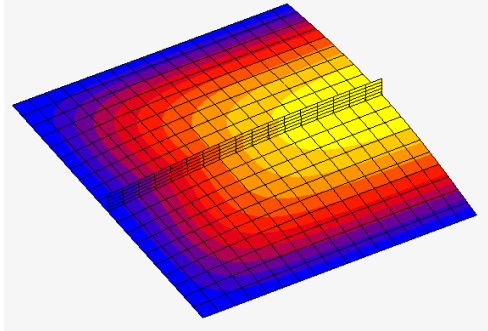
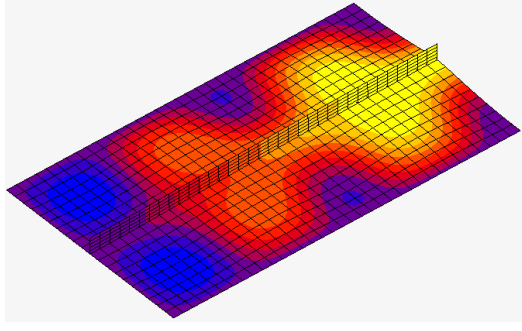
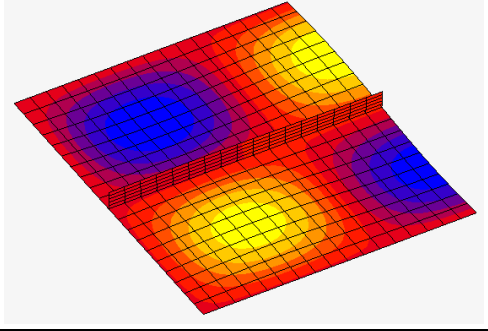
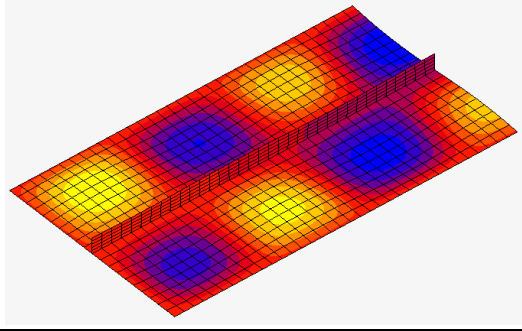
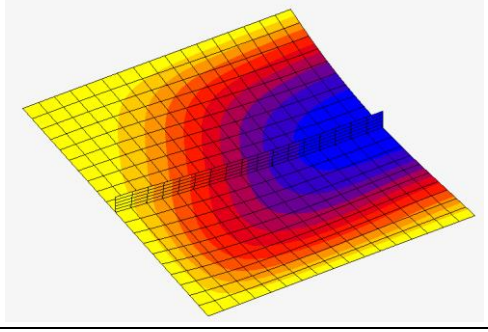
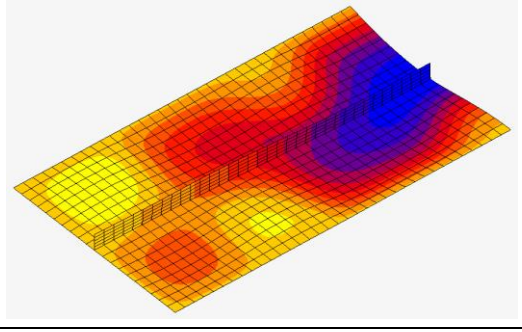


(b) $s=3$

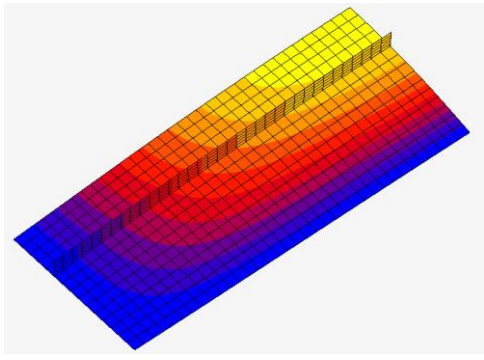
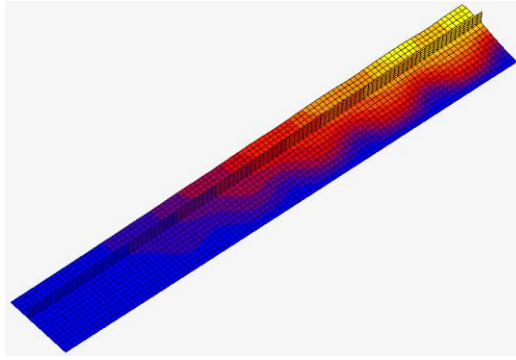
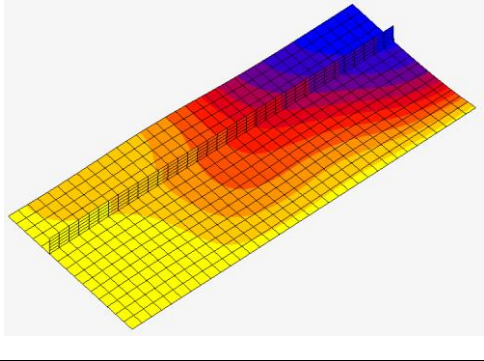
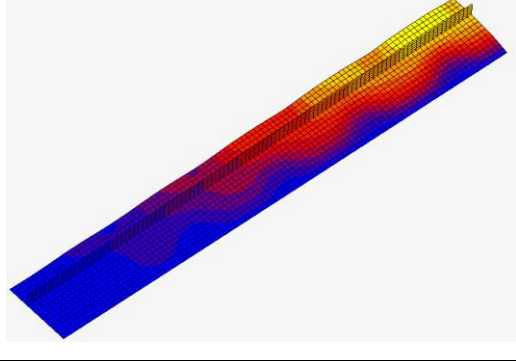
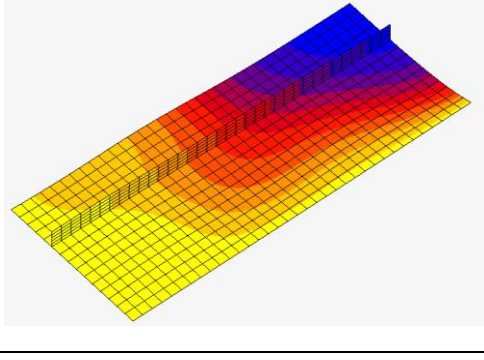
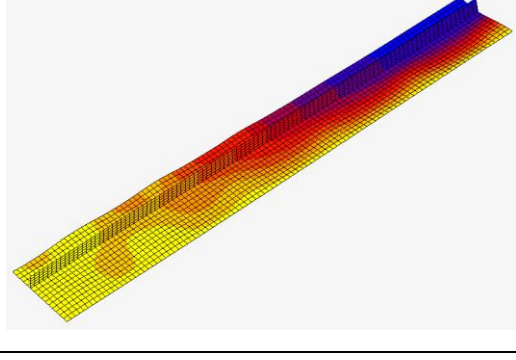
図4.4 耐荷力と長方形板の幅厚比の関係 ($R=2.0$)

表4.4 終局時の面外変形 ($R=2.0$)

(a) $s=2$

	$b/t=85$	$b/t=145$
A1		
	対称条件あり	対象条件あり
B1		
	対称条件あり	対称条件あり
C3		
	対称条件あり	対称条件あり

(b) $s=3$

	$b/t=106$	$b/t=215$
A1		
	対称条件あり	対象条件あり
B1		
	対称条件あり	対称条件あり
C3		
	対称条件あり	対称条件あり

第5章 縦補剛された長方形板の最適断面形状に対する耐荷力

断面積変化率 η が最小値をとるときの断面形状を有する，縦補剛された長方形板の耐荷力と幅厚比パラメータの関係を図5.1に示す．解析対象の寸法と解析値を付録Eに示す．図中の $s=1$ の青色の曲線は無補剛の長方形板の耐荷力曲線であり，次式で与えられる¹²⁾．

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (0.1 \leq R \leq R_1) \\ 1 - 0.4 \frac{R - R_1}{R_2 - R_1} & (R_1 < R < R_2) \\ 0.6 \left(\frac{R_2}{R} \right)^p & (R_2 \leq R \leq 2) \end{cases} \quad (5.1)$$

ここに， R_1 ， R_2 ， p : 表5.1に示す値の定数
 式中の幅厚比パラメータ R は式(2.1)の k に無補剛の長方形板の座屈係数4が用いられたものである．

表5.1 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ および定数 R_1 ， R_2 ， p の値

$\sigma_{0.2}$ (MPa)	R_1	R_2	p
245	0.52	1.26	0.67

$s=2$ と3に対する解析結果は次式で近似される．

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (0.3 \leq R \leq R_1) \\ a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + a_3 R^3 + a_4 R^4 & (R_1 \leq R \leq 2) \end{cases} \quad (5.2)$$

ここに， R_1 ， a_0 ， a_1 ， a_2 ， a_3 ， a_4 : 表5.2に示す値の定数
 式中の幅厚比パラメータ R は式(2.1)の k に，縦補剛された長方形板の座屈係数を与える式(2.10)が用いられたものである．さらに，図2.5(a)を参照して， $s=2$ に対して $b/t=\beta_1$ とこれに対応する t_r/t の値が式(2.10)に用いられる．他方，図2.5(b)を参照して， $s=3$ に対して η が最小値をとるときの b/t の値とこれに対応する t_r/t の値が式(2.10)に用いられる．

表5.2 定数 R_1 ， a_0 ， a_1 ， a_2 ， a_3 ， a_4 および0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ の値

		R_1	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$\sigma_{0.2}$ (MPa)
s	2	0.4	0.854	0.942	-1.771	0.877	-0.141	245
	3	0.4	0.933	0.418	-0.698	0.179	0	

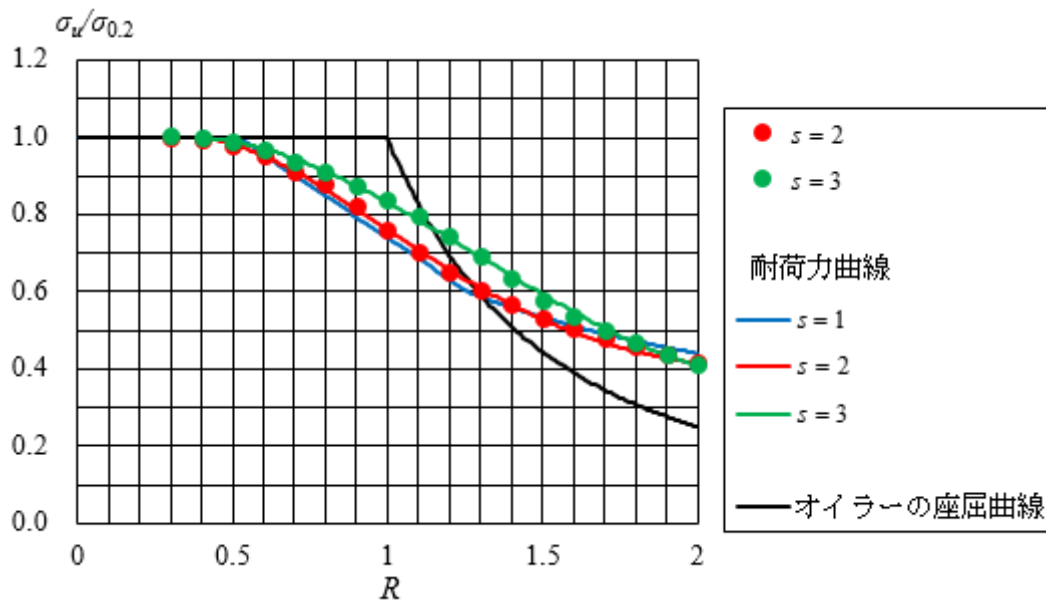


図5.1 耐荷力と幅厚比パラメータの関係

図 5.1 において解析値のプロット点を除いた，耐荷力と幅厚比パラメータの関係を図 5.2 に示す． $R=0.5$ の付近で， $s=1$ の耐荷力曲線が， $s=2$ と 3 の耐荷力曲線よりわずかに上にあるのは，無補剛の長方形板の耐荷力曲線¹²⁾が， $R=0.5$ の付近で，無補剛の長方形板の解析値をわずかに上回ることに起因する（付録 F 参照）．他方， $s=2$ の耐荷力曲線は $R \geq 1.46$ で $s=1$ の耐荷力曲線をわずかに下回り， $s=3$ の耐荷力曲線は $R \geq 1.78$ で $s=1$ の耐荷力曲線をわずかに下回る．これは，4.3 節で述べたように， $R=2.0$ に対して， b/t が β_1 に近づくと，縦補剛された長方形板の耐荷力が，無補剛の長方形板の耐荷力をわずかに下回ることに呼応したものである．

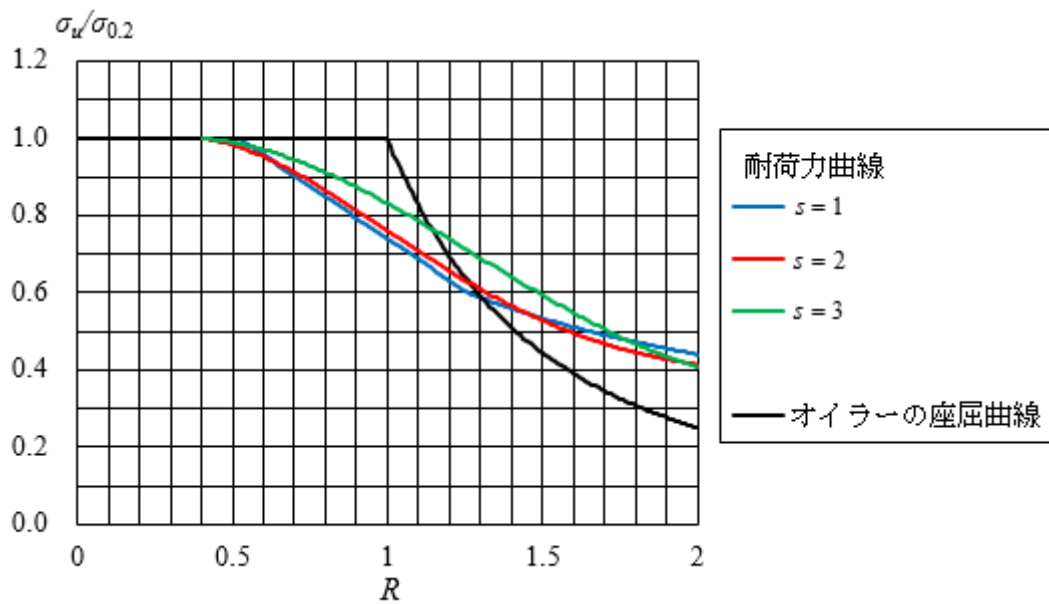


図 5.2 耐荷力と幅厚比パラメータの関係

耐荷力と幅自乗断面積比の関係，すなわち縦補剛された長方形板の最適断面形状に対する耐荷力を図 5.3 に示す．式(2.30)，(2.31)，(2.32)の各式を R について解いて次式を得る．

$s=1$ に対して，

$$R = \frac{b^2}{32.14A} \quad (b^2/A \leq 64.28) \quad (5.3)$$

$s=2$ に対して，

$$R = \frac{\frac{b^2}{A} + 5.78}{60.43} \quad (12.35 \leq b^2/A \leq 115.08) \quad (5.4)$$

$s=3$ に対して，

$$R = \left(\frac{b^2}{49.92A} \right)^{\frac{1}{1.305}} \quad (10.37 \leq b^2/A \leq 123.34) \quad (5.5)$$

式(5.3)を式(5.1)，式(5.4)と(5.5)を式(5.2)に代入することにより，耐荷力 $\sigma_u/\sigma_{0.2}$ と幅自乗断面積比 b^2/A の関係が与えられる．図 5.3 から分かるように，縦補剛された長方形板の最適断面形状に対する耐荷力が無補剛の長方形板の耐荷力よりかなり高くなる．

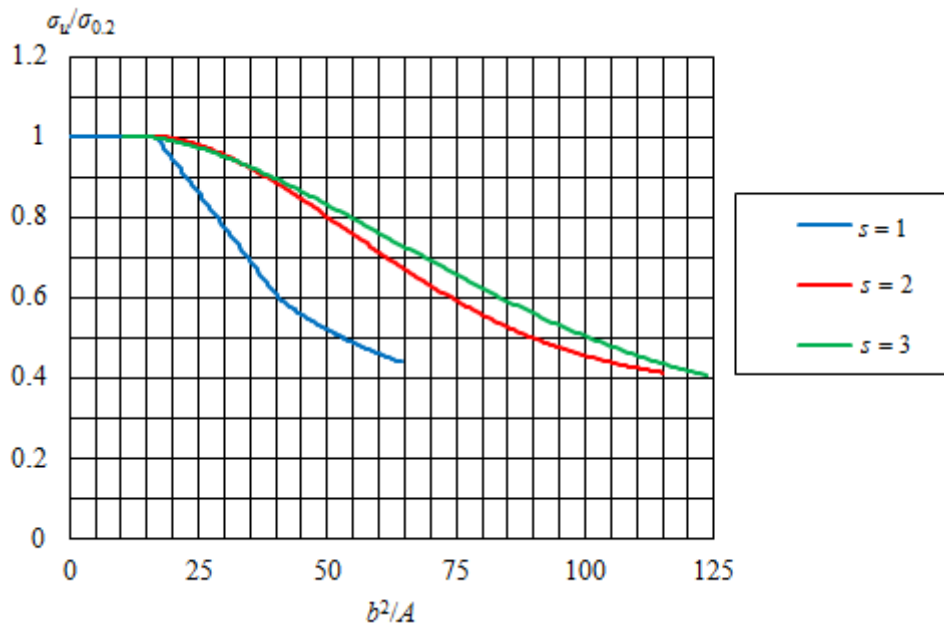
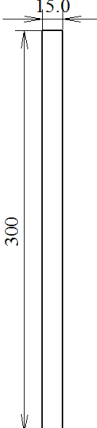
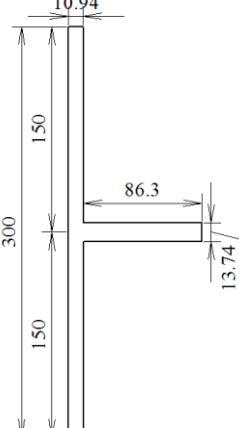
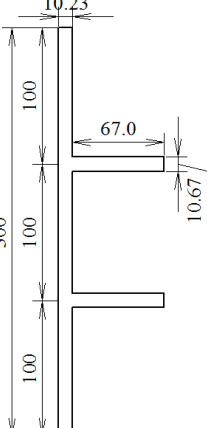
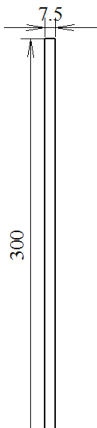
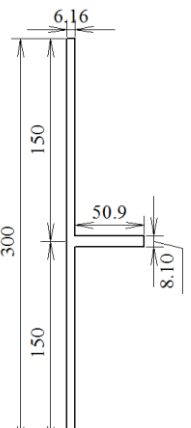
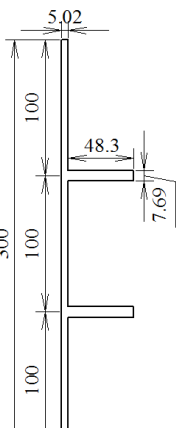
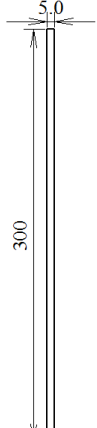
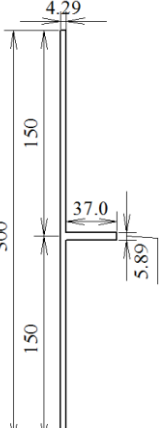
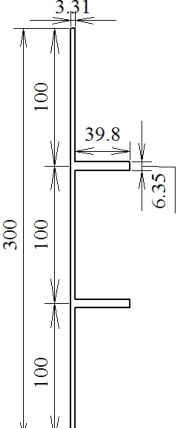


図 5.3 縦補剛された長方形板の最適断面形状に対する耐荷力

幅自乗断面積比 b^2/A のいくつかの値に対して，縦補剛された長方形板の最適断面形状とそれに対する耐荷力を表 5.3 に示す．耐荷力は，無補剛の長方形板に対して式(5.1)，縦補剛された長方形板の最適断面形状に対して式(5.2)によって与えられる．縦補剛された長方形板の最適断面形状は式(2.33)～(2.36)で与えられる．

表 5.3 縦補剛された長方形板の最適断面形状と耐荷力

b^2/A	s		
	1	2	3
20			
	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=0.945$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=0.997$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=0.990$
40			
	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=0.608$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=0.886$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=0.896$
60			
	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=0.461$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=0.714$	$\sigma_u/\sigma_{0.2}=0.762$

第 6 章 結論

本研究では、押出しによって製造される、I 型断面および箱型断面のトラス形材を構成する、縦補剛されたアルミニウム合金 A6061-T6 の板要素が圧縮を受ける場合を想定して、両縁支持された、圧縮を受ける、縦補剛された長方形板がある断面積に対して最大の耐荷力を与える断面形状、すなわち最適断面形状を明らかにし、それに対する耐荷力を与えた。押出ダイスの寸法制限により、幅の大きい縦補剛材をもつトラス形材の製造は困難になることが多い。したがって、本研究では、幅の小さい縦補剛材をもつトラス形材を構成する板要素を想定して、縦補剛材と長方形板が一体となって全体座屈を起こす場合を扱った。本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 幅厚比パラメータ R のある値を満たす、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 の関係が次式で与えられた。

$$\frac{t_r}{t} = \sqrt{\frac{H_2 H_3 (H_3 - 1) + \sqrt{H_2^2 H_3^2 + H_1 H_3 (H_3 - 2)}}{H_1 - H_2^2 H_3^2}} \quad (6.1)$$

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

$$H_2 = \frac{j s \beta_r}{b/t}$$

$$H_3 = \frac{1}{\pi^2} \frac{6(1 - \mu^2)}{R^2} \frac{\sigma_{0.2}}{E} \left(\frac{b}{t}\right)^2$$

R : 圧縮を受ける、縦補剛された長方形板の幅厚比パラメータ

$\sigma_{0.2}$: 0.2% 耐力

E : ヤング係数

μ : ポアソン比

b : 長方形板の板幅

t_r : 縦補剛材の板厚

t : 長方形板の板厚

j : 縦補剛が片側の場合 1, 両側の場合 2

s : 隣接する縦補剛材で区切られた板要素の総数

β_r : 片側の縦補剛材の幅厚比

式(6.1)の適用範囲は次の通りである。

$$\beta_0 \leq b/t \leq \beta_1 = s\beta_0 \quad (6.2)$$

ここに, β_0 : 無補剛の長方形板の幅厚比

β_1 : 縦補剛された長方形板が全体座屈する幅厚比の上限

- (2) 断面積変化率 $\eta=A/A_0$ (A と A_0 は、それぞれ縦補剛された長方形板の断面積と無補剛の長方形板の断面積である) と幅厚比 b/t の関係は、幅厚比パラメータ R のある値に対して、 $s=2$ の場合、 $b/t=\beta_1$ で最小となり、 $s=3$ の場合、 β_1 より小さい b/t の値で最小値をとる。
- (3) 縦補剛材は長方形板の片側の面に設けられる。したがって、縦補剛材と長方形板が一体となった全体座屈に類似する初期たわみ形状に関して、縦補剛材が凹型の初期たわみ形状に対する耐荷力が、凸型の初期たわみ形状に対する耐荷力より低くなる。隣接する縦補剛材で区切られた板要素に生じる局部座屈に類似する初期たわみ形状に関しては、その凹凸の方向によって耐荷力に差異は生じない。縦補剛材が凹型の全体座屈に類似する初期たわみ形状に局部座屈に類似する初期たわみ形状を重ね合わせた初期たわみ形状（この初期たわみ形状を初期たわみ形状 C3 と呼ぶ）が耐荷力を最も低下させる。
- (4) $R=1.0$ に対する $s=2$ と 3 の各場合において、初期たわみ形状 C3 に対する耐荷力は、 b/t が β_0 と β_1 の間でほぼ一定であり、縦補剛された長方形板の耐荷力が無補剛の長方形板の耐荷力より高い。すなわち、式(6.1)によって与えられる断面形状を有する、縦補剛された長方形板の耐荷力は、 b/t が β_0 と β_1 の間で無補剛の長方形板の耐荷力より高くなる。しかし、 $s=2$ の場合、 $R \geq 1.46$ で、 $s=3$ の場合、 $R \geq 1.78$ で、初期たわみ形状 C3 に対する耐荷力は、 b/t が β_0 と β_1 の間で変動は小さいが、 b/t が β_1 に近づくと、無補剛の長方形板の耐荷力をわずかに下回る。
- (5) 縦補剛された長方形板の最適断面形状を与える、幅厚比 b/t と幅自乗断面積比 b^2/A の関係および板厚比 t_r/t と幅自乗断面積比 b^2/A の関係が以下の式によって与えられた。

$s=2$ に対して、

$$\frac{b}{t} = 1.0637 \frac{b^2}{A} + 6.148 \quad (6.3)$$

$$\frac{t_r}{t} = 0.002946 \frac{b^2}{A} + 1.197 \quad (6.4)$$

ここに、 $12.35 \leq b^2/A \leq 115.08$

$s=3$ に対して、

$$\frac{b}{t} = 1.3525 \left(\frac{b^2}{A} \right)^{1.0268} \quad (6.5)$$

$$\frac{t_r}{t} = 0.1982 \left(\frac{b^2}{A} \right)^{0.554} \quad (6.6)$$

ここに、 $10.37 \leq b^2/A \leq 123.34$

幅自乗断面積比 b^2/A に対する耐荷力，すなわち縦補剛された長方形板の最適断面形状に対する耐荷力が次式で与えられた。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (0.3 \leq R \leq R_1) \\ a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + a_3 R^3 + a_4 R^4 & (R_1 \leq R \leq 2) \end{cases} \quad (6.7)$$

$$s=2 \text{ に対して, } R = \frac{\frac{b^2}{A} + 5.78}{60.43} \quad (12.35 \leq b^2/A \leq 115.08) \quad (6.8)$$

$$s=3 \text{ に対して, } R = \left(\frac{b^2}{49.92A} \right)^{\frac{1}{1.305}} \quad (10.37 \leq b^2/A \leq 123.34) \quad (6.9)$$

ここに， R_1 ， a_0 ， a_1 ， a_2 ， a_3 ， a_4 ：表 6.1 に示す値の定数

表6.1 定数 R_1 ， a_0 ， a_1 ， a_2 ， a_3 ， a_4 および0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ の値

		R_1	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$\sigma_{0.2}$ (MPa)
s	2	0.4	0.854	0.942	-1.771	0.877	-0.141	245
	3	0.4	0.933	0.418	-0.698	0.179	0	

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) アルミニウム橋研究会：構造用アルミニウム合金材. http://alst.jp/pdf/aluminum_str_2.pdf
- 5) 大倉一郎：鋼構造設計学の基礎，東洋書店，pp.240-251，2004.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) JIS H4100：アルミニウムおよびアルミニウム合金の押出型材，2015.
- 9) MSC.Software Corporation: Marc Mentat 2013.0.0.
- 10) 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.
- 11) 大倉一郎：鋼構造設計学の基礎，東洋書店，pp.224-228，2004.
- 12) 小笠原康二，大倉一郎：接合位置を考慮したアルミニウム合金板の圧縮耐荷力，構造工学論文集，Vol.56A，pp.101-121，2010.

付録 A 解析対象の寸法[表 3.3 と 3.4]

R	b/t	$b(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	t_r/t	$b_r(\text{mm})$	$t_r(\text{mm})$	$a(\text{mm})$
0.5	32.14	300	9.334	1.263	74.02	11.787	1038.64
1	64.28	300	4.667	1.364	39.99	6.368	944.44
1.6	102.84	300	2.917	1.471	26.94	4.290	905.60

付録 B 解析対象の寸法[表 4.1]

s	b/t	$b(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	t_r/t	$b_r(\text{mm})$	$t_r(\text{mm})$	$a(\text{mm})$
2	64.28	300	4.667	1.364	39.99	6.368	944.44
3	75.05	300	3.997	1.739	43.66	6.953	1279.43

付録 C 解析対象の寸法と解析値 [図 4.3]

図 4.3(a)の解析対象の寸法 ($s=2$)

b/t	$b(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	t_r/t	$b_r(\text{mm})$	$t_r(\text{mm})$	$a(\text{mm})$
37	300	8.108	0.472	24.06	3.831	408.22
42	300	7.143	0.635	28.50	4.538	504.49
47	300	6.383	0.790	31.66	5.041	599.25
52	300	5.769	0.946	34.29	5.460	695.09
57	300	5.263	1.110	36.68	5.841	793.61
64.28	300	4.667	1.364	39.99	6.368	944.44
70	300	4.286	1.583	42.60	6.783	1071.28
75	300	4.000	1.789	44.95	7.158	1189.89

図 4.3(a)の解析値 ($s=2$)

b/t	$\sigma_{ii}/\sigma_{0.2}$		
	A1	B1	C3
37	0.805	0.943	0.825
42	0.836	0.934	0.848
47	0.851	0.898	0.818
52	0.859	0.858	0.794
57	0.864	0.848	0.791
64.28	0.869	0.804	0.762
70	0.871	0.773	0.745
75	0.865	0.752	0.725

図 4.3(b)の解析対象の寸法 (s=3)

b/t	$b(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	t_r/t	$b_r(\text{mm})$	$t_r(\text{mm})$	$a(\text{mm})$
45	300	6.667	0.675	28.25	4.498	574.58
55	300	5.455	0.977	33.48	5.332	780.81
65	300	4.615	1.323	38.34	6.105	1009.74
75.05	300	3.997	1.739	43.66	6.953	1279.43
85	300	3.529	2.260	50.09	7.976	1610.65
96.42	300	3.111	3.091	60.39	9.616	2133.91
105	300	2.857	4.042	72.53	11.549	2731.97
115	300	2.609	6.131	100.45	15.995	4050.71

図 4.3(b)の解析値 (s=3)

b/t	$\sigma_{ii}/\sigma_{0.2}$		
	A1	B1	C3
45	0.838	0.939	0.845
55	0.853	0.928	0.835
65	0.863	0.920	0.836
75.05	0.872	0.907	0.840
85	0.875	0.901	0.841
96.42	0.874	0.883	0.836
105	0.871	0.870	0.832
115	0.858	0.862	0.837

付録 D 解析対象の寸法と解析値 [図 4. 4]

図 4. 4(a)の解析対象の寸法 ($s=2$)

b/t	$b(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	t_r/t	$b_r(\text{mm})$	$t_r(\text{mm})$	$a(\text{mm})$
75	300	4.000	0.568	14.26	2.271	410.22
85	300	3.529	0.752	16.67	2.654	501.06
95	300	3.158	0.926	18.35	2.923	589.67
105	300	2.857	1.100	19.73	3.141	678.06
115	300	2.609	1.278	20.94	3.334	767.41
128.56	300	2.334	1.531	22.43	3.572	891.55
145	300	2.069	1.859	24.15	3.845	1048.84
160	300	1.875	2.183	25.70	4.093	1201.02
175	300	1.714	2.536	27.30	4.347	1363.82

図 4. 4(a)の解析値 ($s=2$)

b/t	$\sigma_{ii}/\sigma_{0.2}$		
	A1	B1	C3
75	0.448	0.485	0.438
85	0.448	0.533	0.449
95	0.451	0.503	0.479
105	0.454	0.485	0.444
115	0.478	0.463	0.441
128.56	0.449	0.442	0.419
145	0.440	0.410	0.398
160	0.432	0.387	0.383

図 4. 4 (b) の解析対象の寸法 ($s=3$)

b/t	$b(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	t_r/t	$b_r(\text{mm})$	$t_r(\text{mm})$	$a(\text{mm})$
85	300	3.529	0.690	15.30	2.436	507.92
106	300	2.830	1.032	18.34	2.920	701.49
127	300	2.362	1.398	20.73	3.302	903.49
148	300	2.027	1.809	23.02	3.666	1123.20
169	300	1.775	2.282	25.43	4.050	1369.79
189.44	300	1.584	2.824	28.08	4.472	1647.26
192.84	300	1.556	2.924	28.57	4.549	1698.09
215	300	1.395	3.670	32.16	5.121	2073.89
240	300	1.250	4.796	37.65	5.996	2636.50

図 4. 4 (b) の解析値 ($s=3$)

b/t	s		
	A1	B1	C3
85	0.492	0.533	0.484
106	0.511	0.498	0.490
127	0.510	0.492	0.485
148	0.490	0.517	0.455
169	0.463	0.486	0.423
189.44	0.436	0.453	0.413
192.84	0.433	0.449	0.408
215	0.401	0.414	0.384
240	0.370	0.382	0.355

付録 E 解析対象の寸法と解析値 [図 5.1]

図 5.1 の $s=2$ の数値データ

R	b/t	$b(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	t_r/t	$b_r(\text{mm})$	$t_r(\text{mm})$	$a(\text{mm})$	$\sigma_w/\sigma_{0.2}$
0.3	19.28	300	15.560	1.249	122.09	19.442	1166.93	1.003
0.4	25.72	300	11.664	1.249	91.52	14.573	1086.13	0.996
0.5	32.14	300	9.334	1.263	74.02	11.787	1038.64	0.979
0.6	38.56	300	7.780	1.282	62.62	9.971	1007.36	0.951
0.7	45	300	6.667	1.303	54.55	8.687	985.62	0.914
0.8	51.42	300	5.834	1.324	48.50	7.722	968.51	0.878
0.9	57.86	300	5.185	1.345	43.79	6.972	955.49	0.822
1	64.28	300	4.667	1.364	39.99	6.368	944.44	0.762
1.1	70.7	300	4.243	1.384	36.87	5.871	935.25	0.704
1.2	77.14	300	3.889	1.403	34.26	5.455	927.79	0.651
1.3	83.56	300	3.590	1.420	32.03	5.100	921.04	0.605
1.4	89.98	300	3.334	1.438	30.10	4.793	915.16	0.567
1.5	96.42	300	3.111	1.455	28.42	4.526	910.24	0.534
1.6	102.84	300	2.917	1.471	26.94	4.290	905.60	0.506
1.7	109.28	300	2.745	1.487	25.63	4.081	901.68	0.481
1.8	115.7	300	2.593	1.502	24.45	3.894	897.91	0.459
1.9	122.12	300	2.457	1.52	23.39	3.725	894.49	0.438
2	128.56	300	2.334	1.531	22.43	3.572	891.55	0.419

図 5.1 の $s=3$ の数値データ

R	b/t	$b(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	t_r/t	$b_r(\text{mm})$	$t_r(\text{mm})$	$a(\text{mm})$	$\sigma_{II}/\sigma_{0.2}$
0.3	14.91	300	20.121	0.707	89.30	14.220	782.38	1.007
0.4	21.98	300	13.649	0.887	76.07	12.113	889.60	1.000
0.5	29.67	300	10.111	1.052	66.78	10.633	976.99	0.990
0.6	37.88	300	7.920	1.203	59.85	9.530	1051.07	0.967
0.7	46.57	300	6.442	1.350	54.61	8.697	1119.48	0.940
0.8	55.68	300	5.388	1.483	50.18	7.990	1175.69	0.911
0.9	65.19	300	4.602	1.614	46.64	7.427	1229.81	0.878
1	75.05	300	3.997	1.739	43.66	6.953	1279.43	0.840
1.1	85.25	300	3.519	1.861	41.12	6.548	1325.74	0.796
1.2	95.76	300	3.133	1.978	38.92	6.198	1369.03	0.743
1.3	106.57	300	2.815	2.093	37.00	5.891	1409.91	0.692
1.4	117.66	300	2.550	2.204	35.29	5.620	1448.59	0.638
1.5	129.01	300	2.325	2.313	33.77	5.378	1485.23	0.581
1.6	140.63	300	2.133	2.419	32.41	5.161	1520.46	0.540
1.7	152.49	300	1.967	2.523	31.18	4.964	1554.10	0.501
1.8	164.58	300	1.823	2.625	30.05	4.786	1586.29	0.469
1.9	176.9	300	1.696	2.726	29.03	4.622	1617.32	0.440
2	189.44	300	1.584	2.824	28.08	4.472	1647.26	0.413

付録F 数値データ [図 5.2]

無補剛板の耐荷力曲線と解析値の比較

R	$\sigma_w/\sigma_{0.2}$	
	耐荷力曲線	解析値
0.4	1	1
0.5	1	0.987
0.6	0.957	0.961
0.7	0.903	0.917
0.8	0.849	0.859
0.9	0.795	0.793
1	0.741	0.731
1.1	0.686	0.678
1.2	0.632	0.633
1.3	0.588	0.596
1.4	0.559	0.563
1.5	0.534	0.536
1.6	0.511	0.512
1.7	0.491	0.491
1.8	0.472	0.472
1.9	0.456	0.455
2	0.440	0.439