

ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金  
A6061-T6 桁のせん断耐荷力

ALST 研究レポート 54

2019 年 3 月

大阪大学大学院工学研究科

鶴見一恵, 大倉一郎

## 概要

ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁のせん断耐荷力の推定式を与える。考慮するアルミニウム合金は 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せん断耐荷力               | …3  |
| 2.1 断面形状                            | …3  |
| 2.2 FEMによる弾塑性有限変位解析                 | …8  |
| 2.2.1 解析対象                          | …8  |
| 2.2.2 応力—ひずみ関係                      | …8  |
| 2.2.3 接合による強度低下と残留応力                | …9  |
| 2.2.4 初期たわみ                         | …10 |
| 2.2.5 境界条件と要素分割                     | …12 |
| 2.3 せん断耐荷力と縦補剛材剛比の関係                | …13 |
| 第3章 曲げ座屈強度に関する最適断面形状を有する長方形板のせん断耐荷力 | …20 |
| 3.1 曲げ座屈強度に関する最適断面形状                | …20 |
| 3.2 せん断耐荷力                          | …22 |
| 第4章 アルミニウム合金桁のせん断耐荷力                | …30 |
| 4.1 アルミニウム合金桁のせん断耐荷力の推定式            | …30 |
| 4.2 桁の断面寸法                          | …32 |
| 4.3 FEMによる弾塑性有限変位解析                 | …35 |
| 4.4 耐荷力曲線と解析値の比較                    | …36 |
| 第5章 結論                              | …40 |
| 参考文献                                | …43 |
| 付録A 図2.6, 2.7, 2.8の数値データ            | …44 |
| 付録B 解析対象の断面寸法                       | …49 |
| 付録C 図3.2の数値データ                      | …51 |
| 付録D 図4.5の数値データ                      | …53 |

## 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が建設され、2003年には既設道路橋の歩道部コンクリート床版の取換え床版として拡幅歩行者用アルミニウム床版が架設された<sup>1)</sup>。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にアルミニウム床版が採用された<sup>3)</sup>。さらに、2016年には、劣化した鉄筋コンクリート床版の取換え床版としてアルミニウム床版が港の棧橋に採用された<sup>4)</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、それを支える桁にもアルミニウム合金材が使用されることが期待される。

アルミニウム合金材を用いた歩道橋の桁の製作方法は、鋼桁のそれと同様で、図1.1に示すように、アルミニウム合金 A5083-O の圧延板を切断し、フランジ、垂直補剛材、水平補剛材を、MIG 溶接による隅肉溶接によってウェブに連結することによって製作される。しかし、道路橋は歩道橋よりも格段に大きな荷重を受けるので、0.2%耐力が 125MPa の A5083-O を使って道路橋を設計することは困難である。道路橋の桁の製作には 0.2%耐力が 245MPa のアルミニウム合金 A6061-T6 が使用されなければならない。しかし、A6061-T6 は熱処理によって 0.2%耐力が高められているので、MIG 溶接を施すと、溶接部の 0.2%耐力が約半分まで低下する。したがって、図1.1に示す桁を A6061-T6 を用いて、MIG 溶接によって製作した場合、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で連結することにより、ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁が提案された<sup>5)</sup>。この桁には中間垂直補剛材が存在せず、ウェブを横断する接合がないので、桁の一断面で強度が低下することはない。

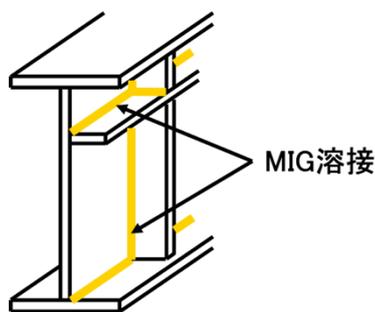


図 1.1 従来のアルミニウム合金桁

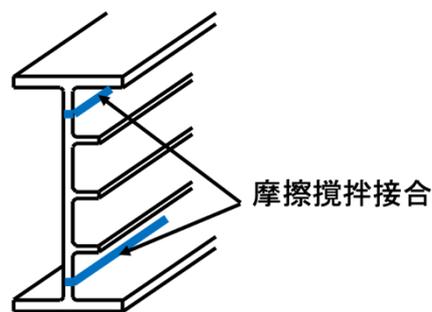


図 1.2 ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁

図1.2に示す、ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁の設計法を確立するために、これまでに、面内曲げを受ける、無補剛の長方形板の耐荷力が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され<sup>6)</sup>、得られた耐荷力をウェブの耐荷力に適用することに

よって、ウェブが無補剛の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<sup>7)</sup>。同様に、面内せん断を受ける、無補剛の長方形板の耐荷力が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され<sup>8)</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って、ウェブが無補剛のアルミニウム合金桁のせん断耐荷力の推定式が与えられた<sup>9)</sup>。

さらに、最近の研究として、面内曲げ座屈強度に関する最適断面形状を有する、縦補剛された長方形板の面内曲げ耐荷力が明らかにされ<sup>10)</sup>、これを桁のウェブに適用することにより、ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁の曲げ耐荷力の推定式が与えられた<sup>11)</sup>。

本研究では、ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁のせん断耐荷力の推定式を与えることを目的とする。考慮するアルミニウム合金は A6061-T6 である。

最初に、せん断応力に関する 0.2%耐力が縦補剛された長方形板のせん断座屈強度で無次元化表示された幅厚比パラメータを用いて表されたせん断耐荷力は縦補剛材剛比によって変動するため、この幅厚比パラメータを用いて縦補剛された長方形板のせん断耐荷力を統一的に表すことはできないことを示す。次に、前述の面内曲げ座屈強度に関する最適断面形状を有する長方形板に対して、そのせん断耐荷力の推定式を与える。最後に、パネル数が 4 でウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁のせん断耐荷力の推定式を与える。

## 第2章 縦補剛された長方形板のせん断耐荷力

### 2.1 断面形状

本研究では、縦補剛材と長方形板が一体となって座屈する場合、すなわち縦補剛された長方形板が全体座屈を起こす場合について検討する。したがって、縦補剛された長方形板の幅厚比パラメータは、図 2.1 を参照して、次式で与えられる。

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

$$\tau_{0.2} = \frac{\sigma_{0.2}}{\sqrt{3}} \quad (2.2)$$

- ここに、 $R$  : せん断を受ける、縦補剛された長方形板の幅厚比パラメータ  
 $\tau_{0.2}$  : せん断応力に関する 0.2% 耐力  
 $\tau_{cr}$  : 縦補剛された長方形板のせん断座屈強度  
 $\sigma_{0.2}$  : 0.2% 耐力  
 $k$  : せん断を受ける、縦補剛された長方形板 (4 辺単純支持) の座屈係数  
 $\mu$  : ポアソン比  
 $E$  : ヤング係数  
 $b$  : 長方形板の板幅  
 $t$  : 長方形板の板厚

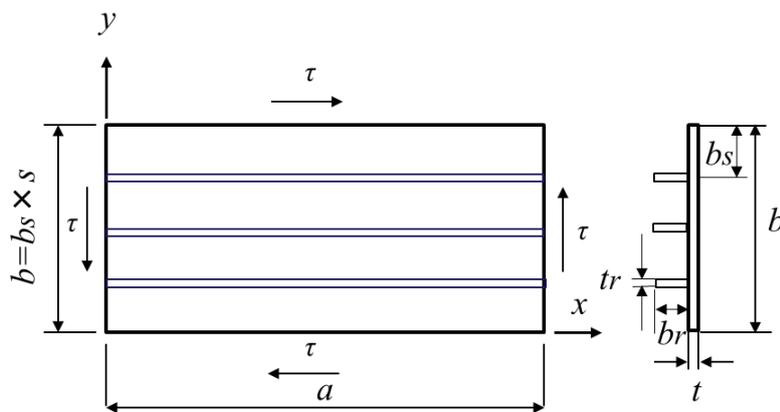


図2.1 せん断を受ける、縦補剛された長方形板

せん断を受ける、縦補剛された長方形板 (4 辺単純支持) の座屈係数  $k$  は次式で与えられる<sup>12)</sup>。

$$k = 5.34 + \frac{4b^2}{a^2} + c_1(\gamma s)^{c_2} \quad (2.3)$$

ここに,  $\gamma = \frac{EI_r}{Db}$  (2.4)

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

- $a$  : 長方形板の長さ ( $a/b \geq 1$ )
- $c_1$  と  $c_2$  : 表 2.1 に示す定数値
- $\gamma$  : 板の曲げ剛性に対する一つの縦補剛材の曲げ剛性の比
- $s$  : 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
- $I_r$  : 一つの縦補剛材の断面二次モーメント
- $D$  : 長方形板の板曲げ剛性

表 2.1 定数値

(a)  $a/b=1$

| $s$ | $c_1$ | $c_2$ |
|-----|-------|-------|
| 2   | 2.32  | 0.44  |
| 3   | 4.87  | 0.39  |
| 4   | 6.87  | 0.42  |

(b)  $a/b=4$

| $s$ | $c_1$ | $c_2$ |
|-----|-------|-------|
| 2   | 1.08  | 0.39  |
| 3   | 0.76  | 0.52  |
| 4   | 0.77  | 0.53  |

(c)  $a/b=8$

| $s$ | $c_1$ | $c_2$ |
|-----|-------|-------|
| 2   | 0.82  | 0.43  |
| 3   | 0.68  | 0.49  |
| 4   | 0.69  | 0.49  |

縦補剛された長方形板が全体座屈を起こす場合のせん断座屈強度は、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場合のせん断座屈強度を超さない。図 2.1 に示す  $a \times b_s$  の板要素が周辺単純支持されていると仮定すると、 $a \times b_s$  の板要素のせん断座屈係数  $k_t$

は次式で与えられる.

$$k_l = 5.34 + \frac{4b_s^2}{a^2} = 5.34 + \frac{4b^2}{s^2 a^2} \quad (2.6)$$

$a \times b_s$  の板要素のせん断座屈強度を, 縦補剛された  $a \times b$  の長方形板のせん断座屈強度で表すと次式になる.

$$\tau_{cr} = k_l \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \frac{1}{(b_s/t)^2} = k_l s^2 \sigma_e = \left( 5.34s^2 + \frac{4b^2}{a^2} \right) \sigma_e \quad (2.7)$$

ここに,

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (2.8)$$

したがって, 式(2.3)の座屈係数  $k$  は式(2.7)の座屈係数を超さないので次式が成立する.

$$5.34 + \frac{4b^2}{a^2} + c_1(\gamma s)^{c_2} \leq 5.34s^2 + \frac{4b^2}{a^2} \quad (2.9)$$

この式より,  $\gamma s$  に対して次の条件を得る.

$$\gamma s \leq \left\{ \frac{5.34(s^2 - 1)}{c_1} \right\}^{\frac{1}{c_2}} \quad (2.10)$$

式(2.10)が与える  $\gamma s$  の上限値を表 2.2 に示す.  $\gamma s$  が上限値以下のとき, 縦補剛された長方形板は全体座屈を起こす.

表 2.2  $\gamma s$  の上限値

| $s \backslash a/b$ | 1   | 4    | 8     |
|--------------------|-----|------|-------|
| 2                  | 81  | 1007 | 1005  |
| 3                  | 262 | 2318 | 4673  |
| 4                  | 358 | 6396 | 16362 |

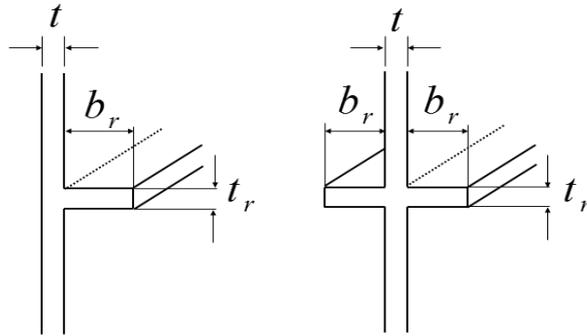
図 2.2 を参照して, 一つの縦補剛材の断面二次モーメント  $I_r$  は次式で与えられる.

$$I_r = \frac{j b_r^3 t_r}{3} \quad (2.11)$$

ここに,  $j$  : 片側補剛の場合 1, 両側補剛の場合 2

$b_r$  : 縦補剛材の板幅

$t_r$  : 縦補剛材の板厚



(a) 片側補剛 (b) 両側補剛

図 2.2 片側補剛と両側補剛

式(2.5)と(2.11)を式(2.4)に代入して次式を得る.

$$\gamma = \frac{4j(1-\mu^2)\beta_r^3(t_r/t)^4}{b/t} \quad (2.12)$$

ここに,  $t_r/t$  : 縦補剛材と長方形板の板厚比

$\beta_r$  : 縦補剛材の幅厚比 ( $= b_r/t_r$ )

$b/t$  : 縦補剛された長方形板の幅厚比

式(2.3)を式(2.1)に代入して次式を得る.

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{5.34 + \frac{4b^2}{a^2} + c_1(\gamma s)^{c_2}} \frac{\tau_{0.2}}{E} \frac{b}{t}} \quad (2.13)$$

式(2.13)を  $b/t$  について解いて次式を得る.

$$\frac{b}{t} = \pi R \sqrt{\frac{5.34 + \frac{4b^2}{a^2} + c_1(\gamma s)^{c_2}}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\tau_{0.2}}} \quad (2.14)$$

式(2.12)の  $b/t$  に式(2.14)を代入して,  $t_r/t$  について解いて次式を得る.

$$\frac{t_r}{t} = \left\{ \frac{\pi R \sqrt{\frac{5.34 + \frac{4b^2}{a^2} + c_1(\gamma s)^{c_2}}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\tau_{0.2}}}}{4j(1-\mu^2)\beta_r^3 s} \right\}^{\frac{1}{4}} \gamma s \quad (2.15)$$

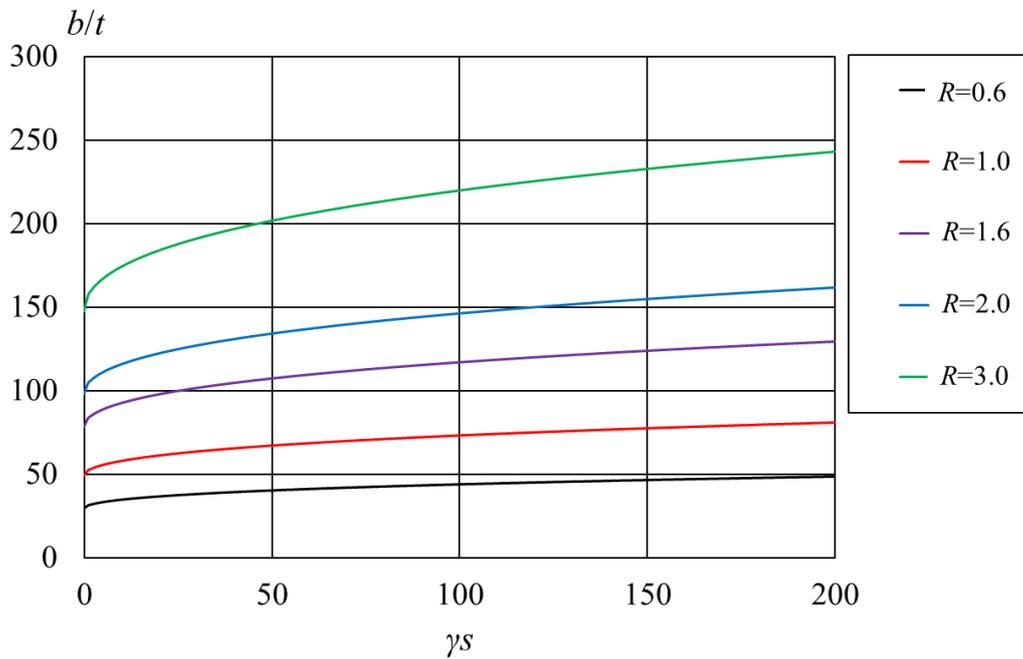
縦補剛材を, 圧縮を受ける自由突出板とみなし, アルミニウム合金の 0.2%耐力を維持する限界の幅厚比パラメータの値に対して縦補剛材の幅厚比を設定する. アルミニウム合金 A6061-T6 に対して限界の幅厚比パラメータの値が 0.60 であり<sup>13)</sup>, 縦補剛材の幅厚比  $\beta_r$  が

次式で与えられる。

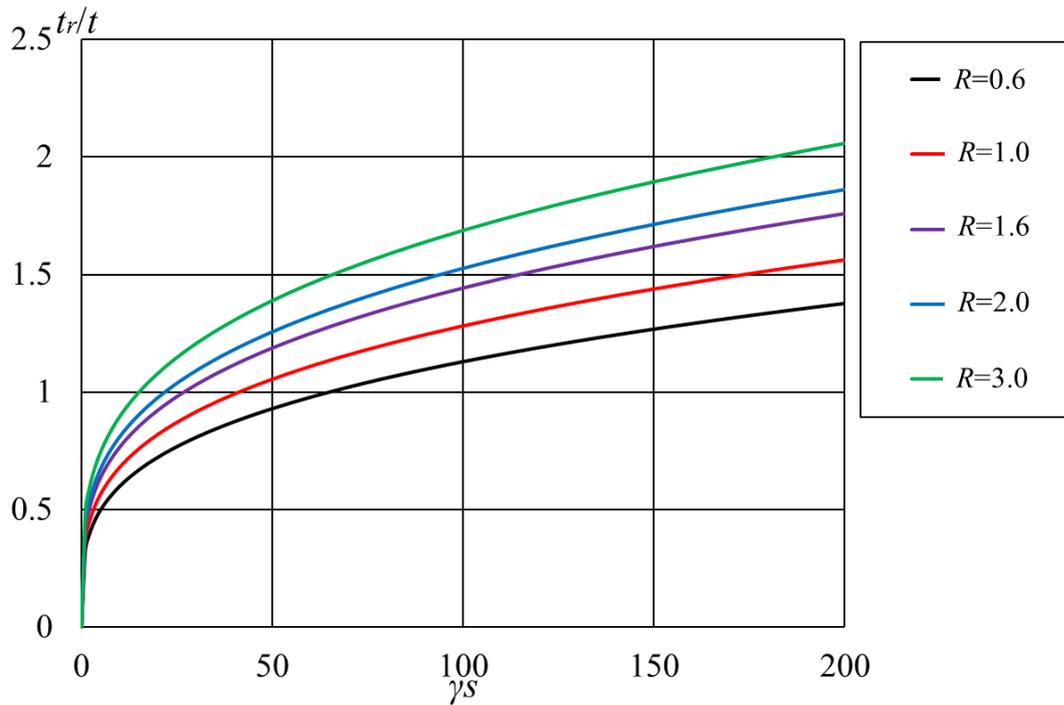
$$\beta_r = 0.60\pi \sqrt{\frac{0.425}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} \quad (2.16)$$

アルミニウム合金のヤング係数  $E$  が 70GPa, ポアソン比  $\mu$  が 0.3 であり, A6061-T6 の 0.2% 耐力  $\sigma_{0.2}$  が 245MPa であるので,  $\beta_r=6.28$  を得る. 式(2.15)の  $\beta_r$  に 6.28 を用いる.

縦補剛された長方形板の断面形状は, 幅厚比パラメータ  $R$ , 縦横比  $a/b$ , 補剛材剛比  $\gamma_s$  および縦補剛材で区切られた板要素の総数  $s$  の値が与えられると, 式(2.14)によって長方形板の幅厚比の値が決まり, 式(2.15)によって縦補剛材と長方形板の板厚比の値が決まる. すなわち, 式(2.14)と(2.15)を用いて,  $a/b$ ,  $R$ ,  $\gamma_s$ ,  $s$  の所定の値に対して縦補剛された長方形板の断面形状が決まる. 一例として,  $a/b=8$ ,  $s=4$  の場合に対して,  $b/t$  と  $\gamma_s$  の関係および  $t_r/t$  と  $\gamma_s$  の関係を, それぞれ図 2.3 (a), (b) に示す. 各  $R$  の値に対して,  $\gamma_s$  が増加すると,  $b/t$  と  $t_r/t$  はともに増加する.



(a)  $b/t$  と  $\gamma_s$  の関係



(b)  $t_r/t$  と  $\gamma_s$  の関係

図 2.3  $a/b=8$ ,  $s=4$  に対する  $b/t$  と  $\gamma_s$  の関係および  $t_r/t$  と  $\gamma_s$  の関係

## 2.2 FEMによる弾塑性有限変位解析

### 2.2.1 解析対象

前節で与えられた式(2.14)と(2.15)の両式を満たす断面形状を有する、縦補剛された長方形板のせん断耐荷力を FEM による弾塑性有限変位解析によって調べる。図 2.1 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。縦横比  $a/b$  に対して 1, 4, 8 を考慮する。板の要素数  $s$  に対して 2, 3, 4 を考慮する。補剛材剛比  $\gamma_s$  に対して 200 以下を考慮する。板幅  $b$  を 600mm として、各寸法を与える。

### 2.2.2 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次式を用いる<sup>14)</sup>。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (\sigma \leq \sigma_{0.2}) \quad (2.17)$$

$$\sigma = \sigma_{0.2} \quad (\sigma > \sigma_{0.2}) \quad (2.18)$$

ここに、 $\varepsilon$  : ひずみ  
 $\sigma$  : 応力  
 $E$  : ヤング係数 (= 70 GPa)

$\sigma_{0.2}$  : 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 245MPa を用いる。同合金のひずみ硬化パラメータ  $n$  の値に対して 29.1 を用いる。これは、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>14)</sup>。

### 2.2.3 接合による強度低下と残留応力

ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁は、図 1.2 に示すように、摩擦攪拌接合を用いて押出型材を突合せ接合することによって製作される。摩擦攪拌接合は MIG 溶接と比べて入熱量が小さいので、摩擦攪拌接合部の強度低下とその範囲は MIG 溶接部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 2.4 に示すように、接合中心から各側 25mm、すなわち 50mm の範囲の板厚を、次式で与えられる板厚に増厚することにより、0.2%耐力に関して、この範囲の断面強度を母材のそれと同じにとることができる<sup>15)</sup>。

$$t_j = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{j0.2}} t = \frac{245}{105} t = 2.33t \quad (2.19)$$

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 (=245MPa)  
 $\sigma_{j0.2}$  : 接合部の 0.2%耐力<sup>15)</sup> (=105MPa)

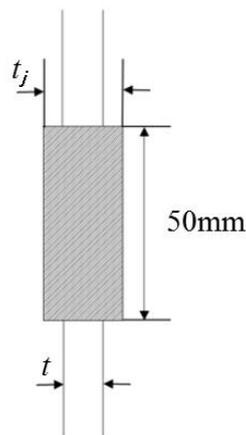


図 2.4 部分的に増厚された板

式(2.19)によって増厚された接合部を有する板のせん断耐荷力は、非接合板のそれより高くなることが示されている<sup>8)</sup>。したがって、非接合板のみを考慮する。

#### 2.2.4 初期たわみ

せん断を受ける，縦補剛された長方形板が全体座屈を起こす場合に対して，次式で与えられる初期たわみを仮定する．

$$w_0 = \frac{b}{250} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (2.20)$$

ここに， $w_0$  : 縦補剛された長方形板の初期たわみ

$m$  : 縦補剛された長方形板の初期たわみの  $x$  軸方向のモード数

$n$  : 縦補剛された長方形板の初期たわみの  $y$  軸方向のモード数

式(2.20)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>15)</sup>で規定される，桁ウェブの製作精度である．式(2.20)の初期たわみモード数  $m$  と  $n$  の値を表 2.3 に示す．表 2.3 の値は座屈形状に基づいて， $m$  は長方形板の  $x$  軸方向の座屈形状の山と谷の総数であり， $n$  は長方形板の  $y$  軸方向の山と谷の総数である<sup>12)</sup>．表 2.2 に示すように， $a/b=1$  で  $s=2$  の場合，縦補剛された長方形板が全体座屈を起こす  $\gamma_s$  の上限値が 81 であるため，表 2.3(a) の  $a/b=1$  で  $s=2$  の場合， $\gamma_s=100$  と 200 に対して  $m$  と  $n$  の値の記載がない．表 2.3 の網掛けが施されている数値については 3.1 節で述べる．

表 2.3  $m$  と  $n$  の値

(a)  $a/b=1$

|            | $s$ |     |     |     |     |     |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|            | 2   |     | 3   |     | 4   |     |
| $\gamma s$ | $m$ | $n$ | $m$ | $n$ | $m$ | $n$ |
| 5          | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| 10         | 1   | 1   | 1   | 2   | 1   | 2   |
| 25         | 1   | 1   | 1   | 2   | 1   | 2   |
| 50         | 1   | 1   | 1   | 2   | 1   | 3   |
| 100        | -   | -   | 1   | 2   | 1   | 3   |
| 200        | -   | -   | 1   | 2   | 1   | 3   |

(b)  $a/b=4$

|            | $s$ |     |     |     |     |     |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|            | 2   |     | 3   |     | 4   |     |
| $\gamma s$ | $m$ | $n$ | $m$ | $n$ | $m$ | $n$ |
| 5          | 2   | 1   | 2   | 1   | 2   | 1   |
| 10         | 2   | 1   | 2   | 1   | 2   | 1   |
| 25         | 2   | 1   | 2   | 1   | 2   | 1   |
| 50         | 2   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| 100        | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |
| 200        | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   | 1   |

(c)  $a/b=8$

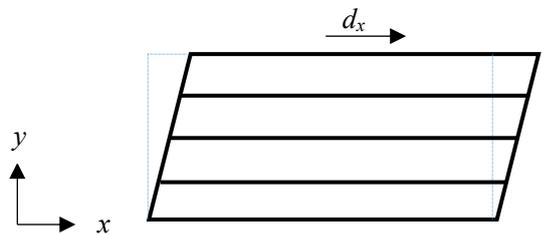
|            | $s$ |     |     |     |     |     |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|            | 2   |     | 3   |     | 4   |     |
| $\gamma s$ | $m$ | $n$ | $m$ | $n$ | $m$ | $n$ |
| 5          | 4   | 1   | 4   | 1   | 4   | 1   |
| 10         | 4   | 1   | 3   | 1   | 3   | 1   |
| 25         | 3   | 1   | 3   | 1   | 3   | 1   |
| 50         | 3   | 1   | 3   | 1   | 3   | 1   |
| 100        | 3   | 1   | 2   | 1   | 2   | 1   |
| 200        | 2   | 1   | 2   | 1   | 2   | 1   |

### 2.2.5 境界条件と要素分割

縦補剛された長方形板の境界条件は、面内せん断を受ける無補剛の長方形板の境界条件と同じである<sup>8)</sup>。すなわち、縦補剛された長方形板が桁のフランジと端補剛材によって、面外方向に対して周辺単純支持されていると仮定する。フランジと端補剛材の伸び剛性は大きいと仮定して、各辺の伸び変形はゼロとする。さらに、フランジと端補剛材の板曲げ剛性は小さいと仮定して、長方形板の面内において、辺の長さ方向に対して直角方向の変位を自由とする。縦補剛された長方形板の面内方向の境界条件を表 2.4 に示す。表中の  $u$  と  $v$  は、それぞれ  $x$  軸方向と  $y$  軸方向の変位である。下辺の水平変位を固定し、上辺を水平方向に強制変位させる。縦補剛材の両端の境界条件に対して、 $z$  軸方向（長方形板の面外方向）および  $y$  軸方向の変位を固定する。

表 2.4 境界条件

| 辺     | $u$       | $v$ |
|-------|-----------|-----|
| $x=0$ | 自由        | 固定  |
| $x=a$ | 自由        | 固定  |
| $y=0$ | 固定        | 自由  |
| $y=b$ | 変位量 $d_x$ | 自由  |



汎用有限要素法解析プログラム MARC<sup>16)</sup>を用いて弾塑性有限変位解析を行う。有限要素として 8 節点シェル要素 (MARC における要素番号 22) を用いる。要素分割数と精度の関係<sup>12)</sup>から、板幅方向を表 2.5 に示す要素分割数で長方形板を等分割し、有限要素の形状を正方形として長さ方向を分割する。さらに、縦補剛材の要素分割数に関しては幅方向を 2 要素で分割する。要素分割の一例を図 2.5 に示す。

表 2.5 長方形板の板幅方向の要素分割数

| $a/b$ | $s$ |    |    |
|-------|-----|----|----|
|       | 2   | 3  | 4  |
| 1     | 20  | 21 | 20 |
| 4     | 8   | 9  | 8  |
| 8     | 8   | 9  | 8  |

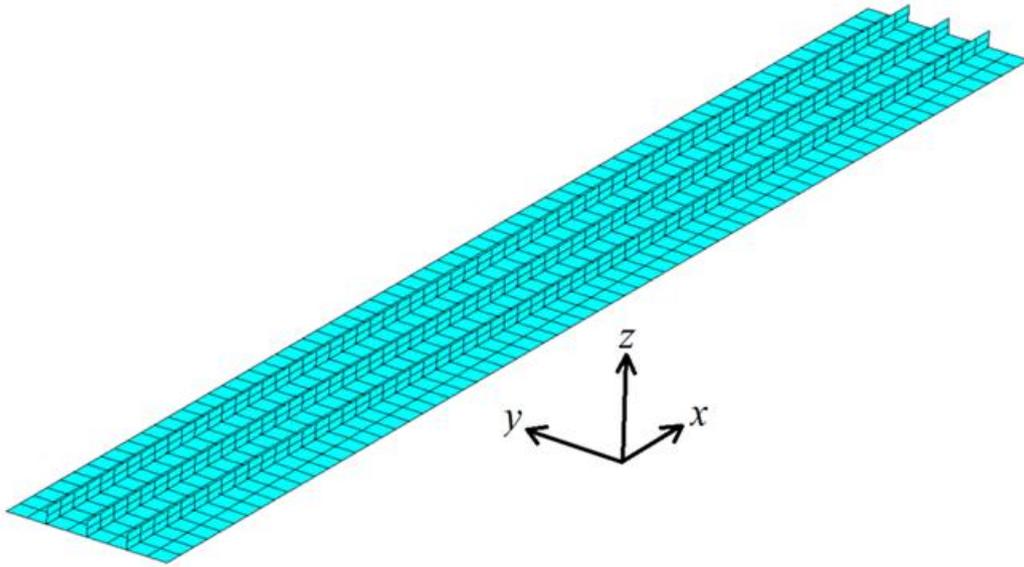


図 2.5 要素分割 ( $a/b=8, s=4$ )

### 2.3 せん断耐力と縦補剛材剛比の関係

$\tau_u/\tau_{0.2}$  と  $R$  の関係を、縦横比  $a/b$  が 1, 4, 8 に対して、それぞれ図 2.6, 2.7, 2.8 に示す。 $a/b, R, \gamma_s, s$  の所定の値に対して、式(2.14)と(2.15)によって決定された断面形状を有する、縦補剛された長方形板に対する解析結果が図に与えられている。解析値の数値データを付録 A に示す。せん断耐力  $\tau_u$  は、長方形板の上辺の節点に生じる  $x$  軸方向の反力の合計を長方形板の上辺の断面積で除すことにより与えられる。これは、長方形板  $x=0$  の辺の節点（縦補剛材の端の節点を除く）に生じる  $y$  軸方向の反力の合計を、縦補剛材の断面積を除いた長方形板の断面積  $bt$  で除すことにより与えられる値と一致する。せん断応力に関する 0.2% 耐力  $\tau_{0.2}$  および幅厚比パラメータ  $R$  は、それぞれ、後出の式(2.22)、式(2.23)で与えられる。図中の黒色の実線は、無補剛の長方形板のせん断耐力曲線であり、次式で与えられる<sup>8)</sup>。

$$\frac{\tau_u}{\tau_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (R \leq 0.6) \\ \frac{1.2}{R} - \frac{0.36}{R^2} & (0.6 < R < 1.09) \\ 0.8 \left( \frac{1.09}{R} \right)^{0.81} & (1.09 \leq R \leq 3.0) \end{cases} \quad (2.21)$$

ここに、

$$\tau_{0.2} = \frac{\sigma_{0.2}}{\sqrt{3}} = \frac{245}{\sqrt{3}} = 141.5 \text{ MPa} \quad (2.22)$$

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{5.34 + \frac{4b^2}{a^2} + c_1(\gamma s)^{c_2}} \frac{\tau_{0.2} b}{E t}} = \frac{4.728 \times 10^{-2} b}{\sqrt{5.34 + \frac{4b^2}{a^2} + c_1(\gamma s)^{c_2}}} \frac{b}{t} \quad (2.23)$$

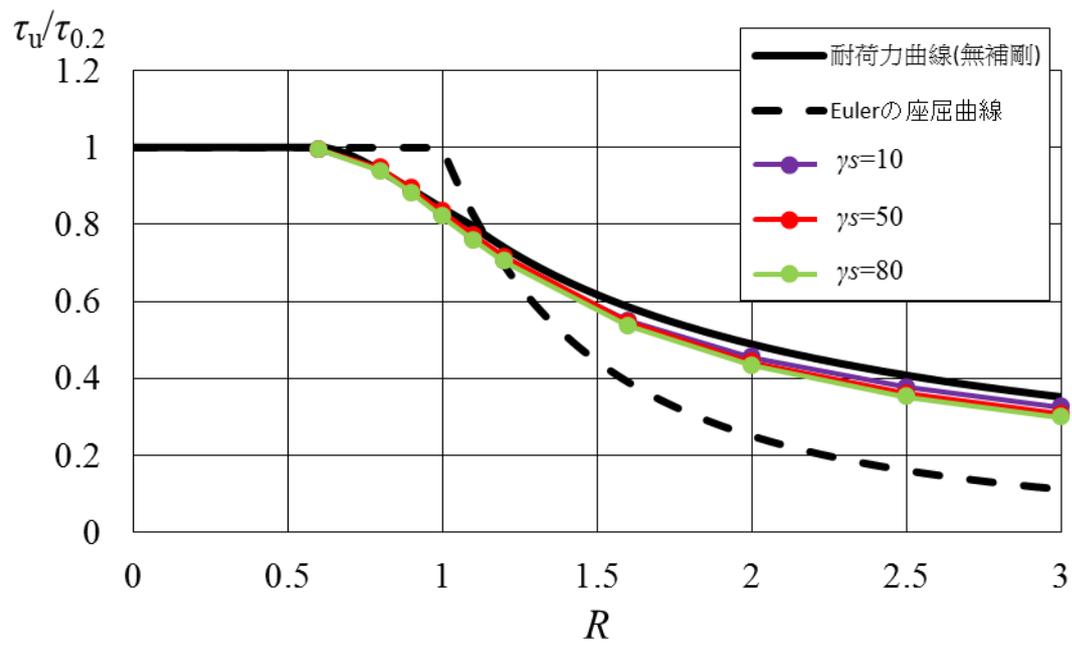
さらに、黒色の破線は、次式で与えられる Euler の座屈曲線である。

$$\frac{\tau_u}{\tau_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (R \leq 1) \\ \frac{1}{R^2} & (R \geq 1) \end{cases} \quad (2.24)$$

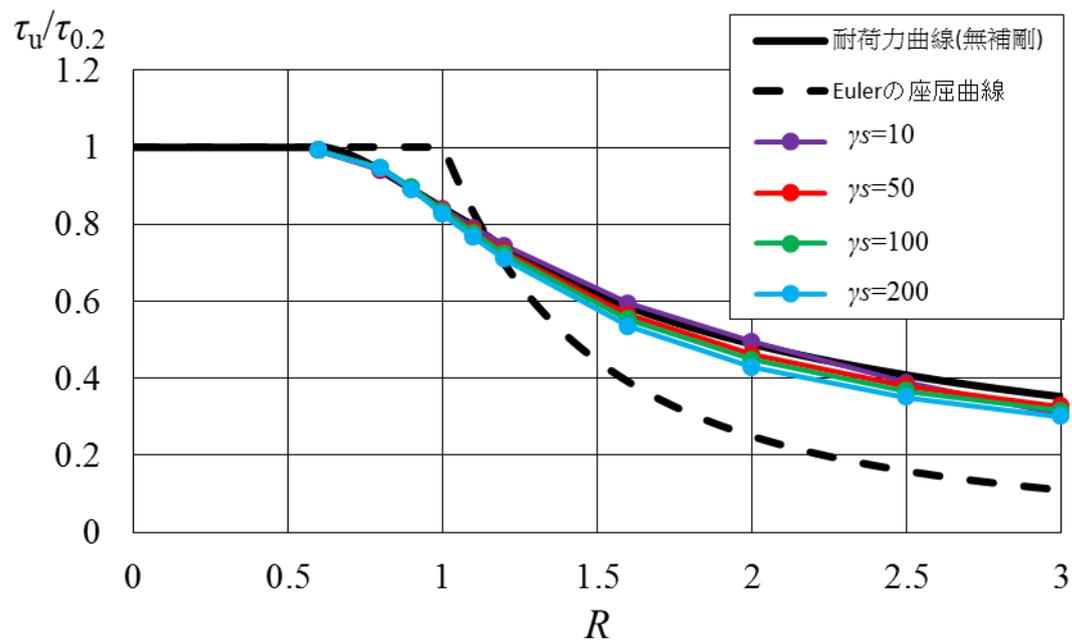
図 2.6, 2.7, 2.8 より、 $\tau_u/\tau_{0.2}$  と  $R$  の関係に対して次項が確認できる。

- (1)  $a/b=1$  に対する図 2.6 について、 $s$  が大きくなるに従って、 $\gamma s$  の値の違いによって解析値の変動が大きくなる。  $s=2$  の場合、解析値は無補剛の耐荷力曲線を少し下回る。  $s=3$  の場合、 $\gamma s=10$  の解析値は無補剛の耐荷力曲線上にあり、 $\gamma s$  が大きくなるに従って、解析値は少しずつ無補剛の耐荷力曲線から下がる。  $s=4$  の場合、 $\gamma s=10$  の解析値が無補剛の耐荷力曲線を最も大きく下回り、 $\gamma s=50$  の解析値は耐荷力曲線を上回り、 $\gamma s=100$  と 200 の解析値は、 $\gamma s=10$  と 20 の解析値の間にある。
- (2)  $a/b=4$  に対する図 2.7 について、各  $s$  の値に対して、 $\gamma s$  の値の違いによる解析値の変動は小さい。無補剛の耐荷力曲線が座屈曲線に交差する付近までは、解析値が無補剛の耐荷力曲線を上回るが、それ以降では、解析値が無補剛の耐荷力曲線を下回る。
- (3) 図 2.8 に示すように、 $a/b=8$  に対する解析値の傾向は  $a/b=4$  に対する解析値の傾向に類似している。無補剛の耐荷力曲線が座屈曲線に交差した後、 $a/b=8$  の解析値の、無補剛の耐荷力曲線からの低下は  $a/b=4$  のそれより大きい。

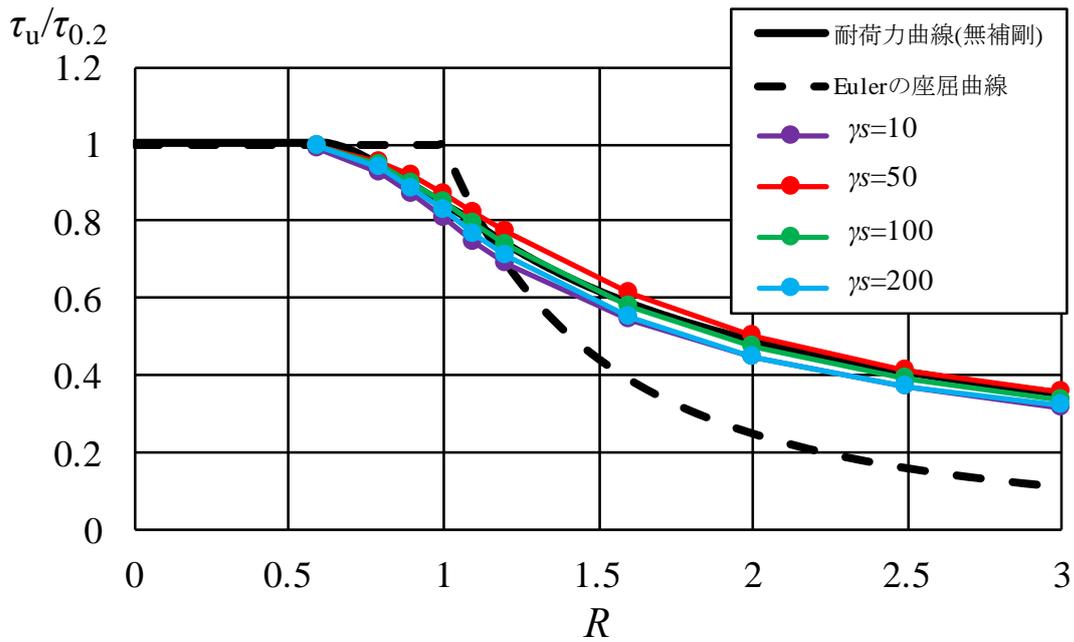
縦補剛された長方形板の座屈係数 [式(2.3)参照] が導入された幅厚比パラメータ  $R$  [式(2.23)参照] によって表されたせん断耐荷力は  $\gamma s$  の値によって変動する。したがって、せん断応力に関する 0.2%耐力が縦補剛された長方形板のせん断座屈強度で無次元化表示された幅厚比パラメータによって表されたせん断耐荷力は縦補剛材剛比によって変動するため、この幅厚比パラメータを用いて縦補剛された長方形板のせん断耐荷力を統一的に表すことはできない。



(a)  $s=2$

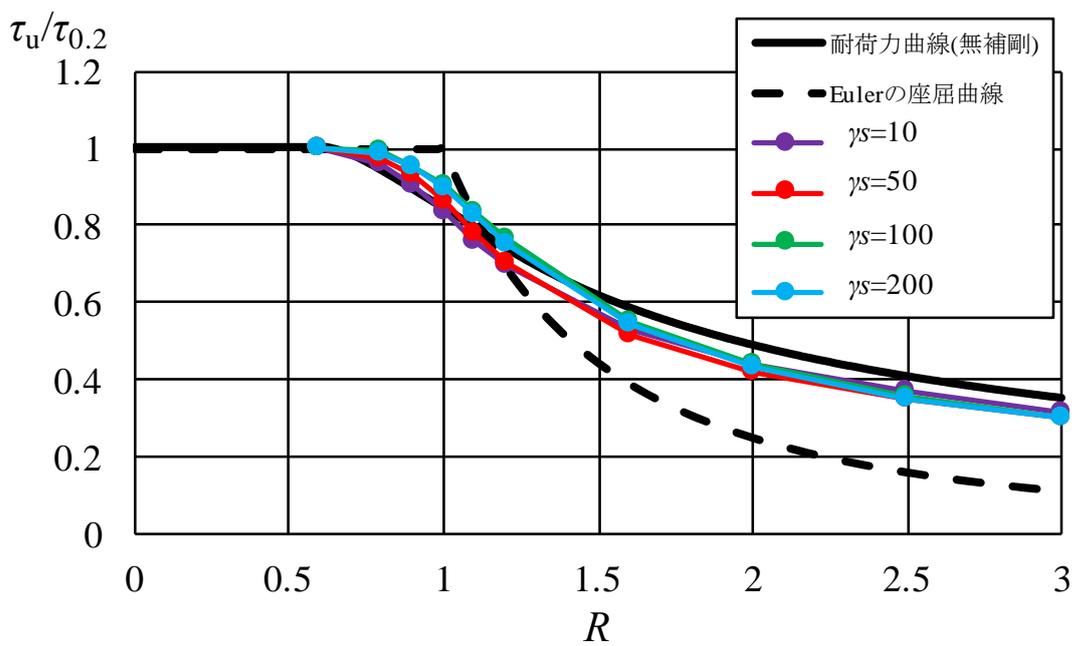


(b)  $s=3$

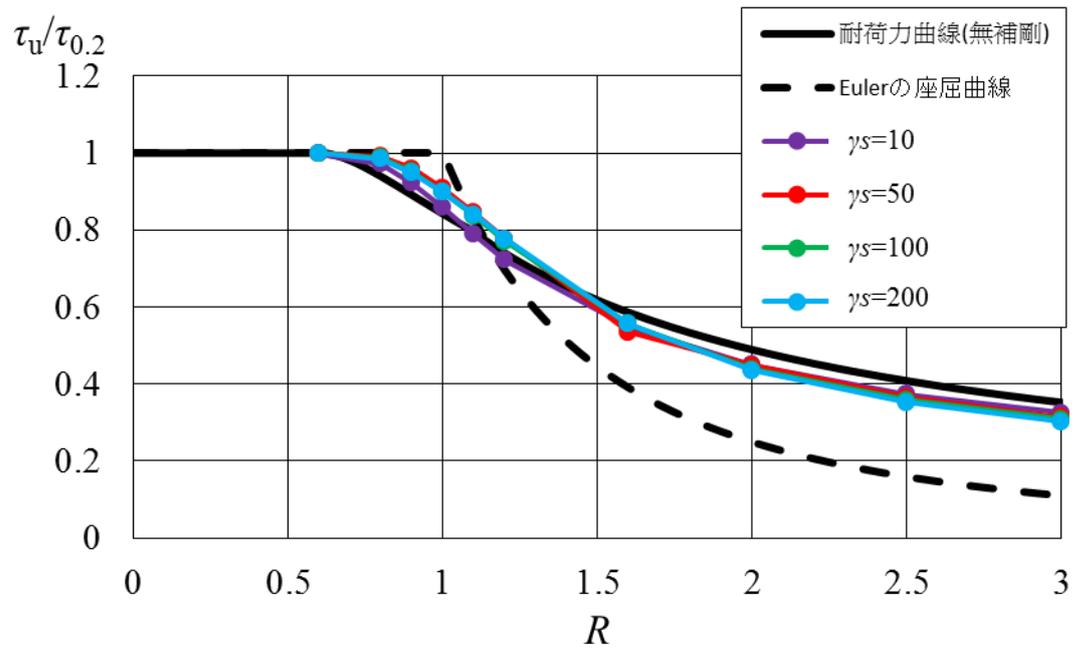


(c)  $s=4$

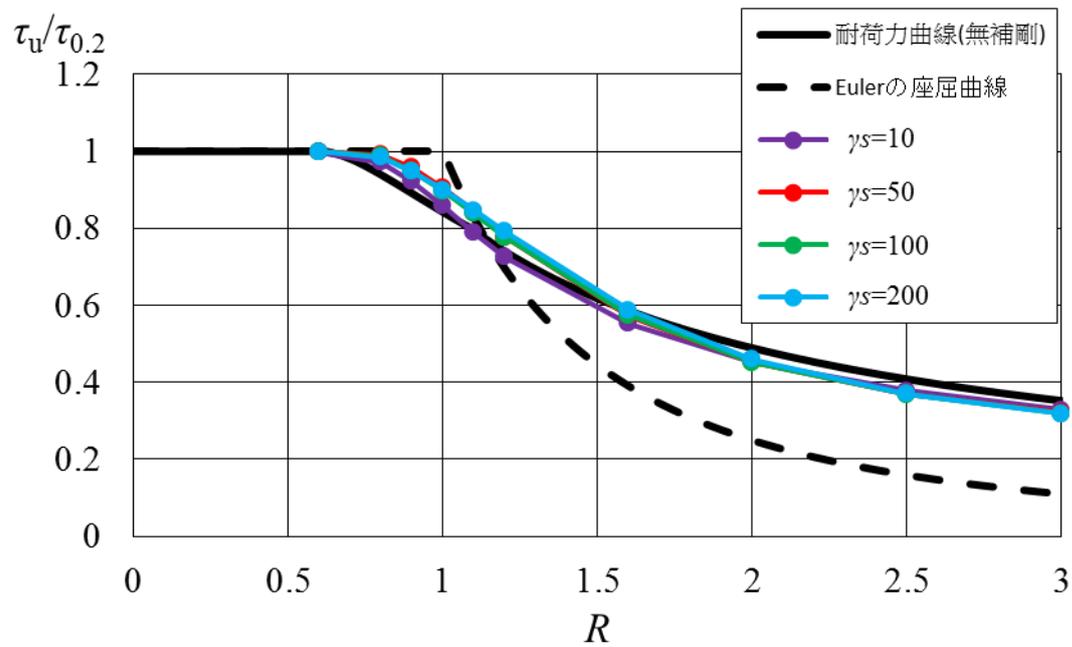
図 2.6  $a/b=1$  に対する  $\tau_u/\tau_{0.2}$  と  $R$  の関係



(a)  $s=2$

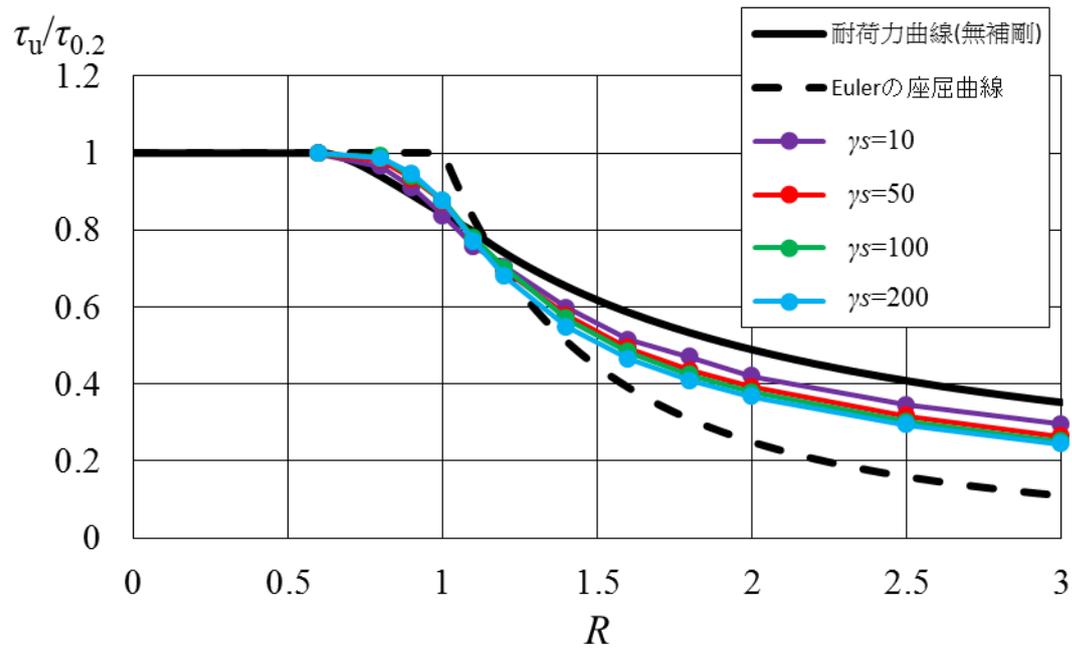


(b)  $s=3$

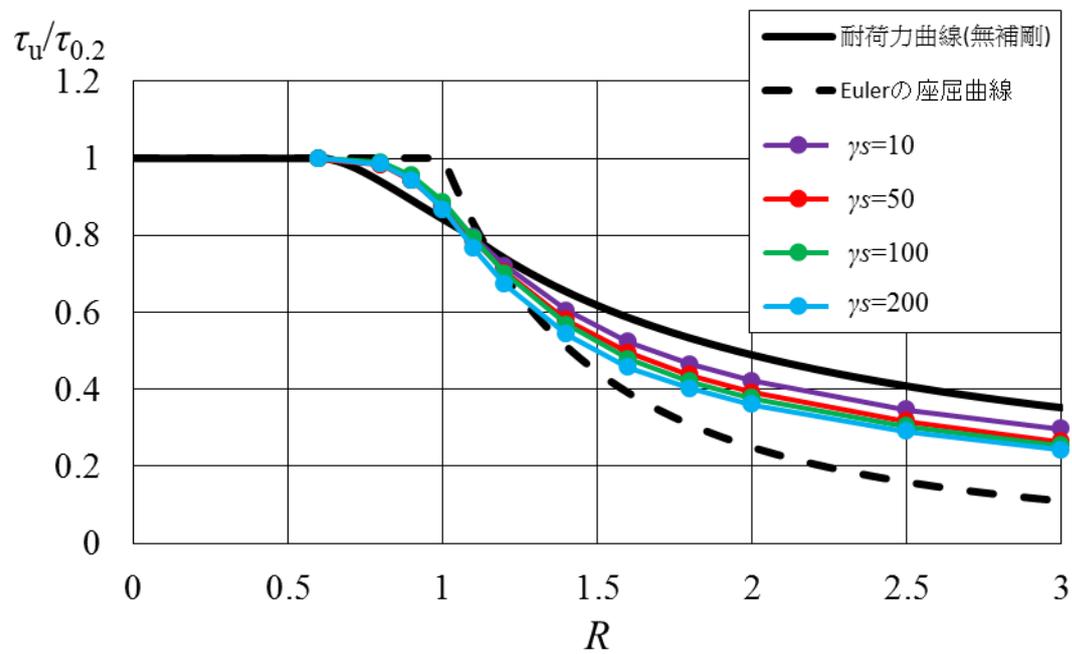


(c)  $s=4$

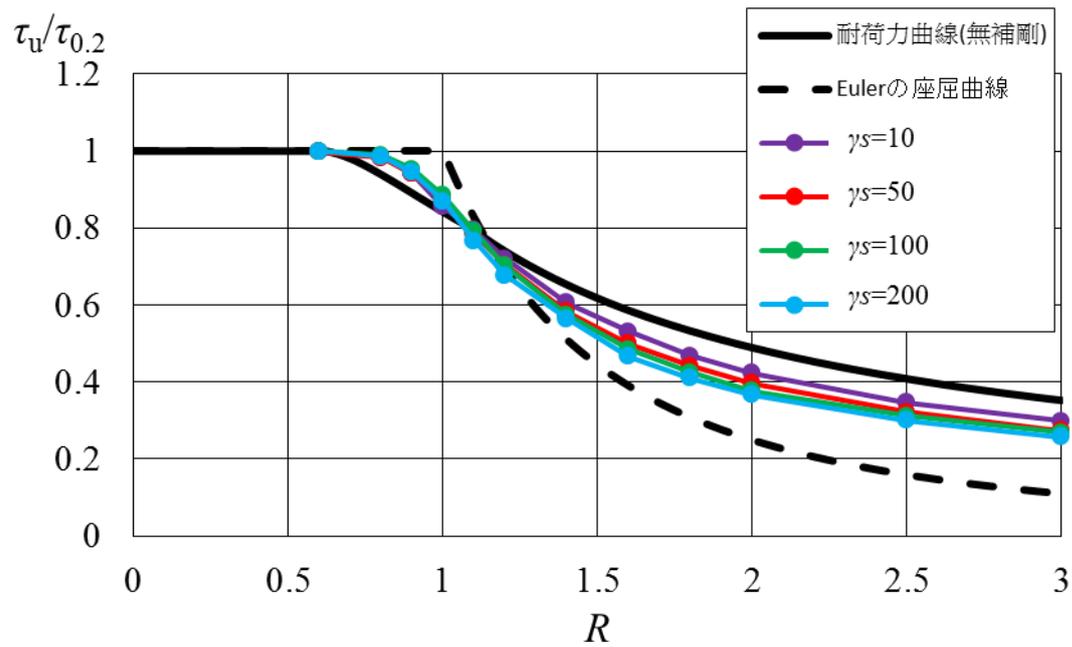
図 2.7  $a/b=4$  に対する  $\tau_u/\tau_{0.2}$  と  $R$  の関係



(a)  $s=2$



(b)  $s=3$



(c)  $s=4$

図 2.8  $a/b=8$  に対する  $\tau_u/\tau_{0.2}$  と  $R$  の関係

## 第3章 曲げ座屈強度に関する最適断面形状を有する長方形板の せん断耐荷力

### 3.1 曲げ座屈強度に関する最適断面形状

面内曲げを受ける，縦補剛された長方形板の座屈強度を最大にするような断面形状，すなわち曲げ座屈強度に関する最適断面形状が与えられ，その断面形状を有する長方形板の面内曲げ耐荷力が明らかにされた<sup>10)</sup>．曲げ座屈強度に関する最適断面形状を有する長方形板が桁のウェブに適用される場合，桁は曲げモーメントとせん断力を受けるので，曲げ座屈強度に関する最適断面形状を有する長方形板のせん断耐荷力を明らかにする必要がある．

曲げ座屈強度に関する最適断面形状を表す式を表 3.1 に示す<sup>10)</sup>． $t_{em}$  は等価板厚であり，縦補剛材の断面積を含めた長方形板の全断面積と同じ大きさの断面積を有する無補剛の長方形板の板厚であり，次式で定義される．

$$t_{em} = \frac{A}{b} \tag{3.1}$$

ここに， $A$ ：縦補剛材の断面積を含めた長方形板の全断面積

さらに，表 3.1 の曲げ座屈強度に関する最適断面形状を与える式から  $b/t_{em}$  を消去して，表 3.2 に示す  $t_r/t$  と  $b/t$  の関係式を得る．縦補剛材の板幅  $b_r$  は次式で与えられる．

$$b_r = 6.28t_r \tag{3.2}$$

表 3.1  $b/t$  と  $b/t_{em}$  の関係および  $t_r/t$  と  $b/t_{em}$  の関係

| $s$ | 曲げ座屈強度に関する最適断面形状を表す式                          |   | $b/t_{em}$ の適用範囲                    |
|-----|---|---|-------------------------------------|
| 2   | $\frac{b}{t} = 1.01 \frac{b}{t_{em}} + 0.85$  | $\frac{t_r}{t} = 0.18 \left( \frac{b}{t_{em}} \right)^{0.25}$ | $25 \leq \frac{b}{t_{em}} \leq 175$ |
| 3   | $\frac{b}{t} = 1.034 \frac{b}{t_{em}} + 4.37$ | $\frac{t_r}{t} = 0.34 \left( \frac{b}{t_{em}} \right)^{0.20}$ | $29 \leq \frac{b}{t_{em}} \leq 222$ |
| 4   | $\frac{b}{t} = 1.073 \frac{b}{t_{em}} + 12.5$ | $\frac{t_r}{t} = 0.58 \left( \frac{b}{t_{em}} \right)^{0.15}$ | $29 \leq \frac{b}{t_{em}} \leq 263$ |

表 3.2  $t_r/t$  と  $b/t$  の関係式

| $s$ | $t_r/t$ と $b/t$ の関係式   | $b/t$ の適用範囲                    |
|-----|--|--------------------------------|
| 2   | $\frac{t_r}{t} = 0.180 \left( \frac{b}{t} - 0.85 \right)^{0.25}$ | $26 \leq \frac{b}{t} \leq 178$ |
| 3   | $\frac{t_r}{t} = 0.337 \left( \frac{b}{t} - 4.37 \right)^{0.20}$ | $34 \leq \frac{b}{t} \leq 234$ |
| 4   | $\frac{t_r}{t} = 0.574 \left( \frac{b}{t} - 12.5 \right)^{0.15}$ | $43 \leq \frac{b}{t} \leq 295$ |

表 3.2 の  $t_r/t$  と  $b/t$  の関係式を式(2.12)に代入して得られる、曲げ座屈強度に関する最適断面形状の  $\gamma_s$  と  $b/t$  の関係を図 3.1 に示す。同図の  $\gamma_s$  の変動範囲を表 3.3 に示す。

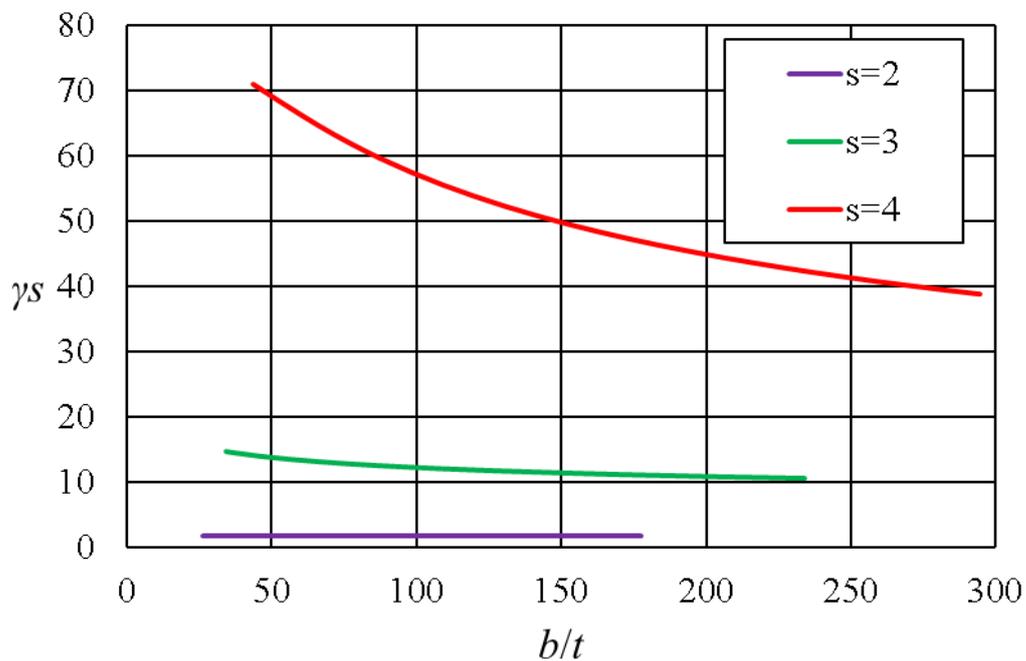


図 3.1 曲げ座屈強度に関する最適断面形状の  $\gamma_s$  と  $b/t$  の関係

表 3.3 曲げ座屈強度に関する最適断面形状の  $\gamma_s$  の変動範囲

| $s$ | $\gamma_s$ の変動範囲               |
|-----|--------------------------------|
| 2   | $1.75 \leq \gamma_s \leq 1.76$ |
| 3   | $10.5 \leq \gamma_s \leq 14.3$ |
| 4   | $38.9 \leq \gamma_s \leq 70.8$ |

表 3.2 の関係式と式(3.2)を満たす断面形状を有する，縦補剛された長方形板のせん断耐荷力を FEM による弾塑性有限変位解析によって算出する．解析方法は 2.2 節と同様である．解析対象の断面寸法を付録 B に示す．

縦補剛された長方形板の初期たわみを与える式(2.20)の  $m$  と  $n$  の値を表 3.4 に示す． $m$  と  $n$  の値は， $s=2, 3, 4$  に対して，それぞれ  $\gamma_s=5, 10, 50$  に対する  $m$  と  $n$  の値を表 2.3 から選んだものである（表 2.3 の網掛けが施された数値）．

表 3.4  $m$  と  $n$  の値

|     | $a/b$ |     |     |     |     |     |
|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
|     | 1     |     | 4   |     | 8   |     |
| $s$ | $m$   | $n$ | $m$ | $n$ | $m$ | $n$ |
| 2   | 1     | 1   | 2   | 1   | 4   | 1   |
| 3   | 1     | 2   | 2   | 1   | 3   | 1   |
| 4   | 1     | 3   | 1   | 1   | 3   | 1   |

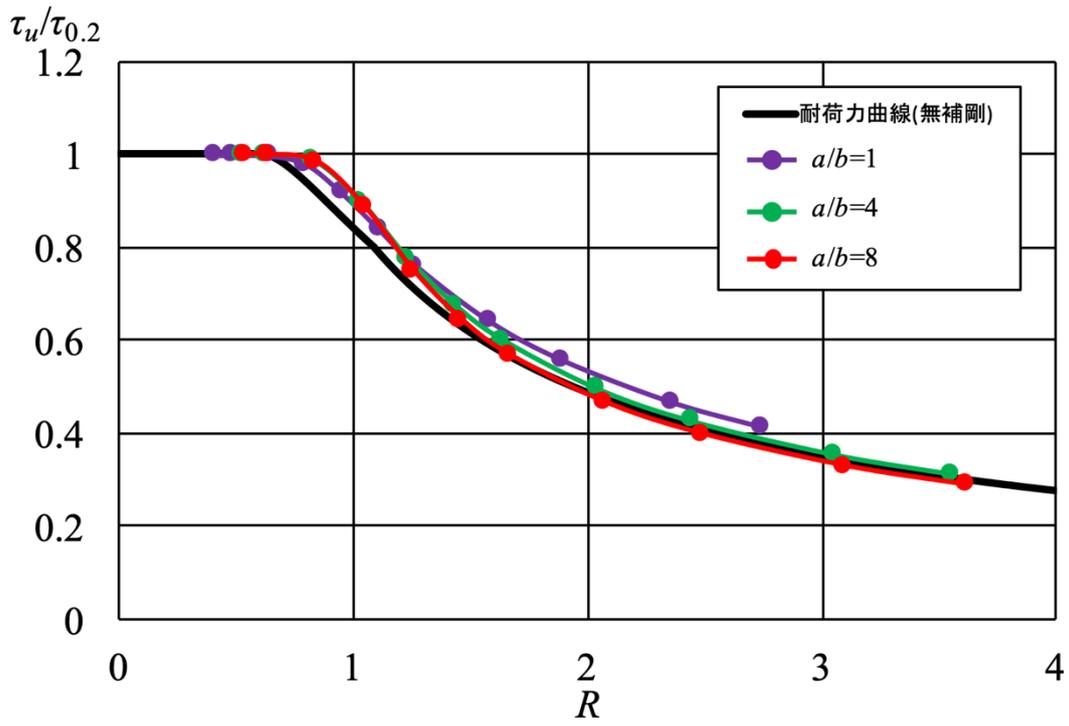
### 3.2 せん断耐荷力

曲げ座屈強度に関する最適断面形状を有する長方形板の  $\tau_u/\tau_{0.2}$  と  $R$  の関係を図 3.2 に示す．数値データを付録 C に示す．図の  $R$  は次式で与えられる．

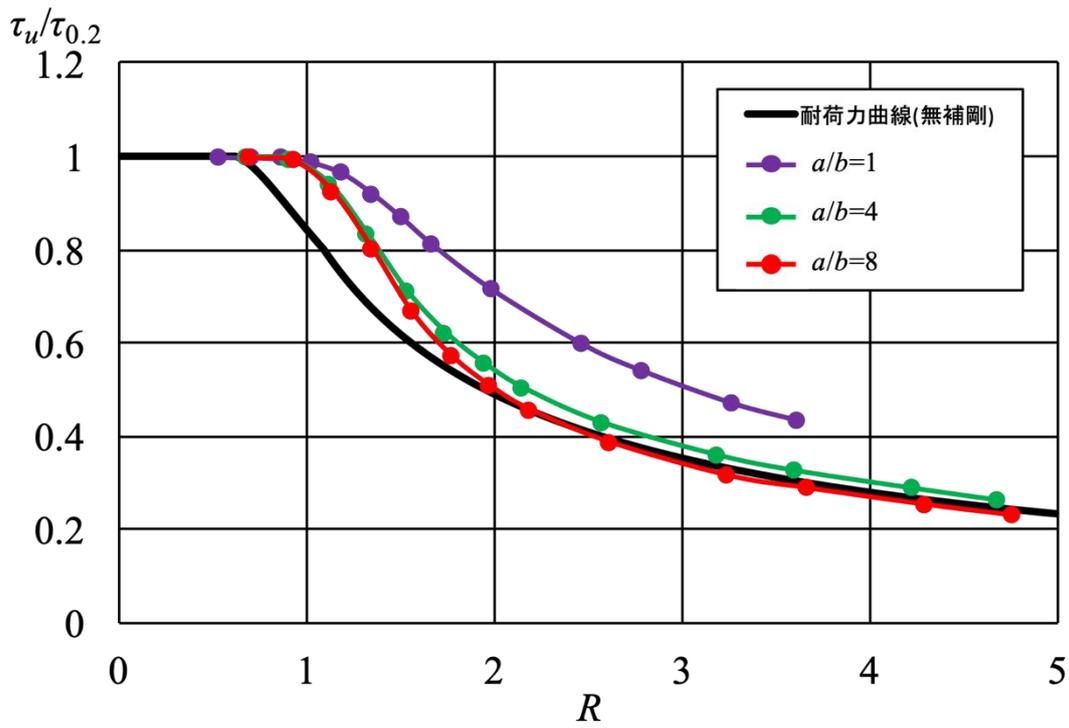
$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)\tau_{0.2}b}{5.34 + \frac{4b^2}{a^2}} \frac{E}{t}} = \frac{4.728 \times 10^{-2} b}{\sqrt{5.34 + \frac{4b^2}{a^2}}} \quad \left(1 \leq \frac{a}{b}\right) \quad (3.3)$$

2.3 節で述べたように，縦補剛された長方形板の座屈係数 [式(2.3)参照] が導入された幅厚比パラメータ  $R$  [式(2.23)参照] によって評価されたせん断耐荷力は  $\gamma_s$  の値によって変動する．そこで，式(2.23)から  $c_1(\gamma_s)^{c_2}$  を削除，すなわち長方形板の座屈強度に対する縦補剛材の寄与を無視して，曲げ座屈強度に関する最適断面形状を有する長方形板のせん断耐荷力を式(3.3)で定義される幅厚比パラメータで評価する．この場合，縦補剛材の効果は，耐荷力曲線の上昇として表れる．

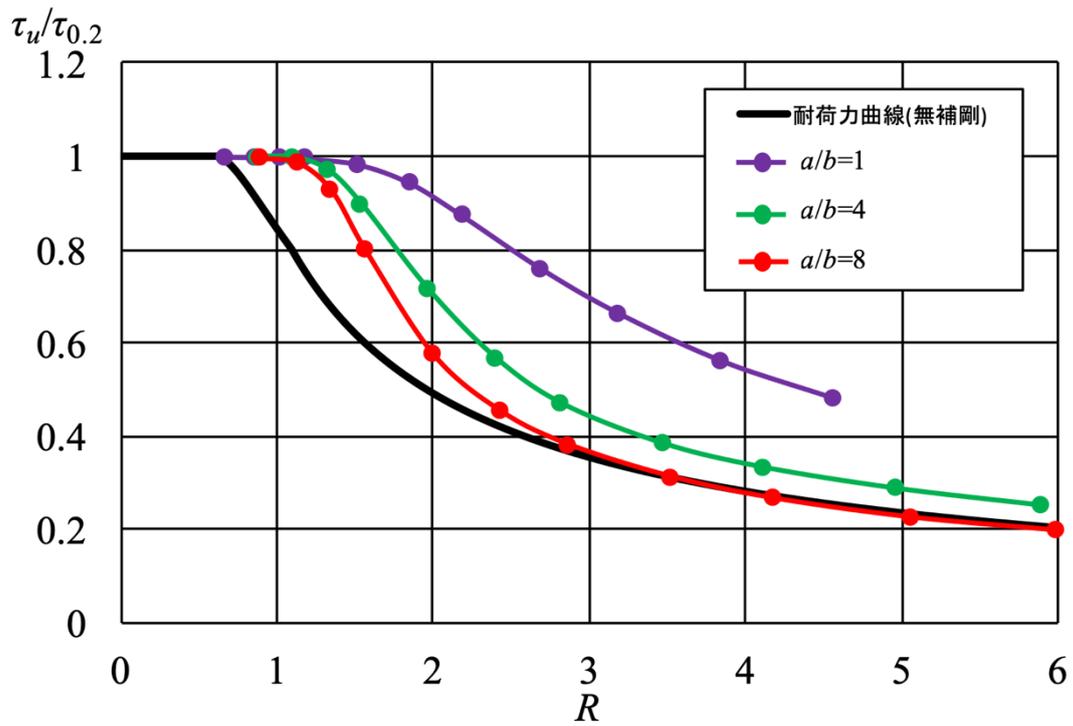
図 3.2 の黒色の実線は無補剛の長方形板のせん断耐荷力を示す．このせん断耐荷力は式(2.21)で与えられ，3.0 以上の  $R$  の値に対しても同式が適用できると仮定している．図 3.2 より， $s$  の各値に対して，縦横比  $a/b$  が大きくなるに従って，解析値は低下し，しかも  $R$  が大きくなるに従って，解析値は無補剛の長方形板のせん断耐荷力に近づく．特に， $a/b=8$  の解析値は， $R$  が大きくなると無補剛の長方形板の耐荷力曲線に重なる．すなわち， $R$  が大きくなるに従って，耐荷力に対する縦補剛材の効果は小さくなり， $a/b=8$  ではその効果はなくなる．



(a)  $s=2$



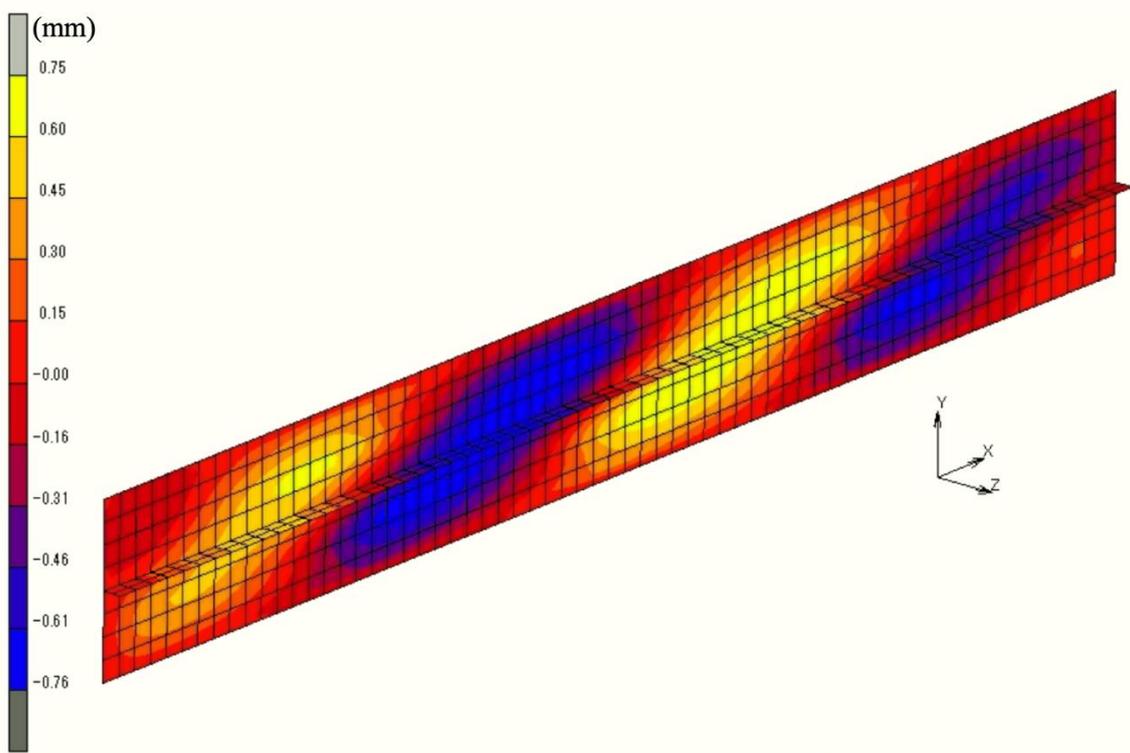
(b)  $s=3$



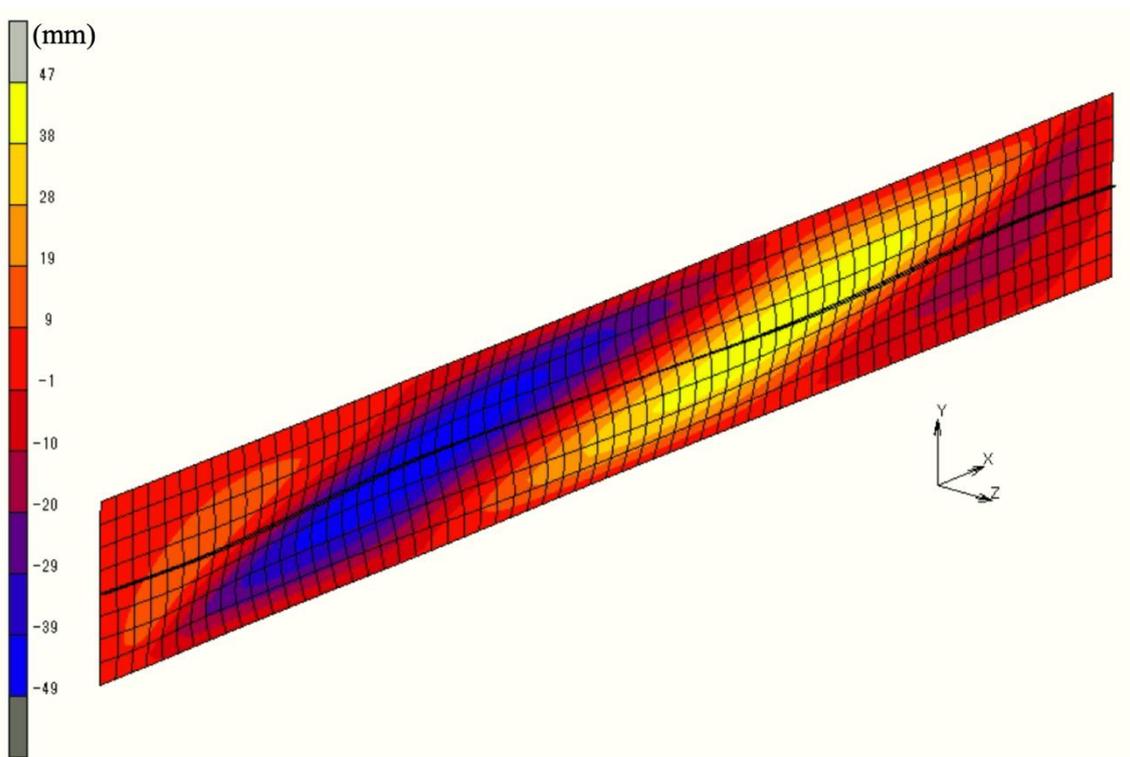
(c)  $s=4$

図 3.2  $\tau_u/\tau_{0.2}$  と  $R$  の関係

$a/b=8$  に対する縦補剛された長方形板の終局時の変形の例を図 3.3 に示す。縦補剛材と長方形板が一体となって面外変形を起こしていることが分かる。

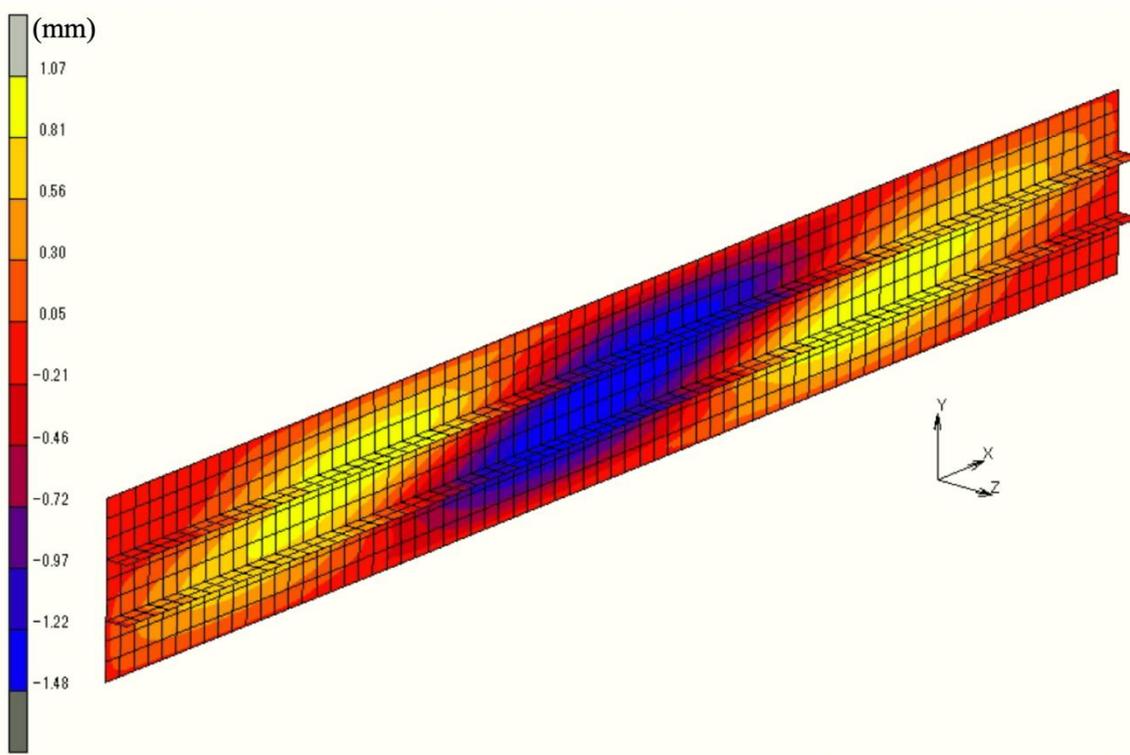


(a)  $R=0.53$

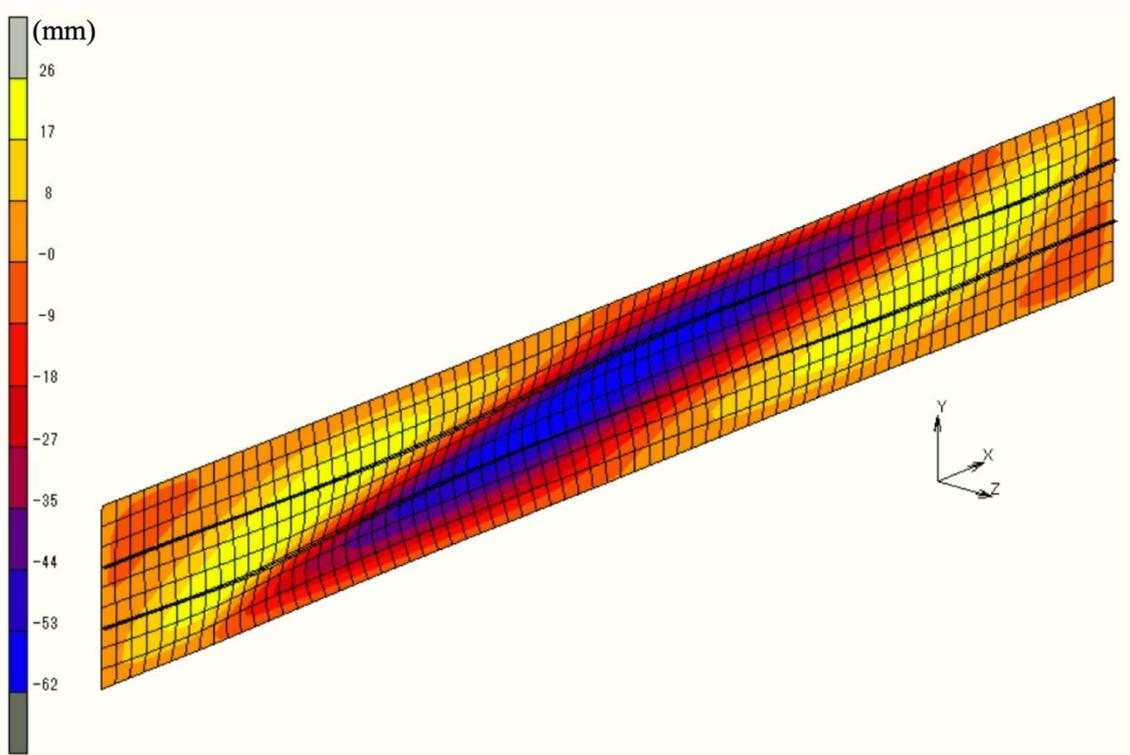


(b)  $R=3.61$

(A)  $s=2$



(a)  $R=0.70$



(b)  $R=4.76$

(B)  $s=3$

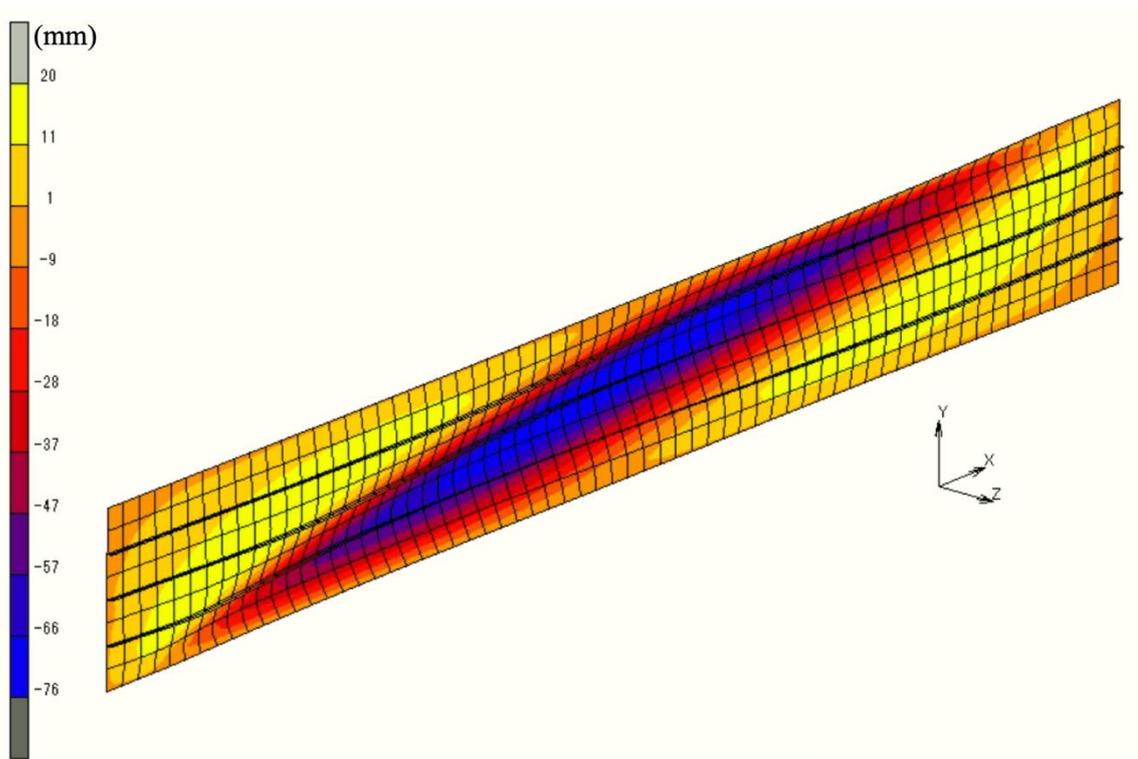
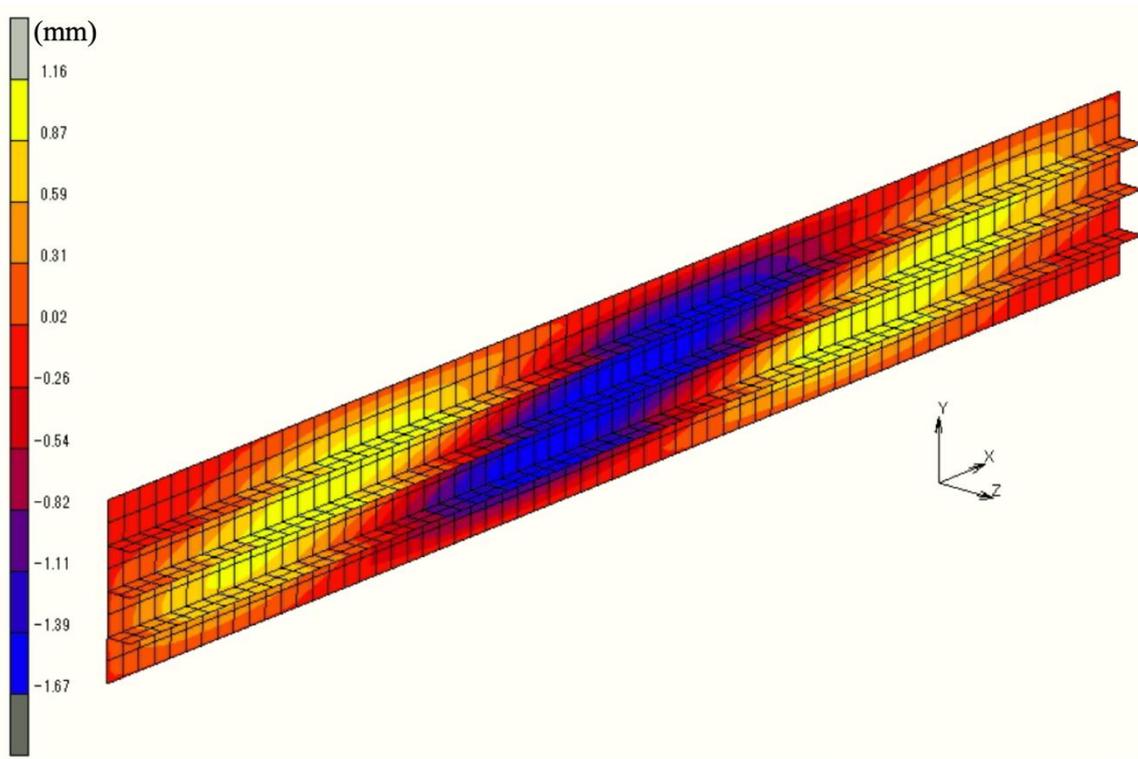


図 3.3  $a/b=8$  に対する縦補剛された長方形板の終局時の変形

ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁は中間垂直補剛材を持たない。したがって、上下フランジと隣接する荷重集中点の垂直補剛材とで囲まれたウェブの縦横比  $a/b$  は大きくなる。そこで、図 3.2 の  $s$  の各値に対して、縦横比  $a/b=8$  に対する解析値を図 3.4 に示す。幅厚比パラメータ  $R$  が大きくなると、縦補剛された長方形板の耐荷力は、無補剛の長方形板の耐荷力と等しくなる。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と等しくなる幅厚比パラメータの値は、パネル数  $s$  の増加に伴って大きくなる。

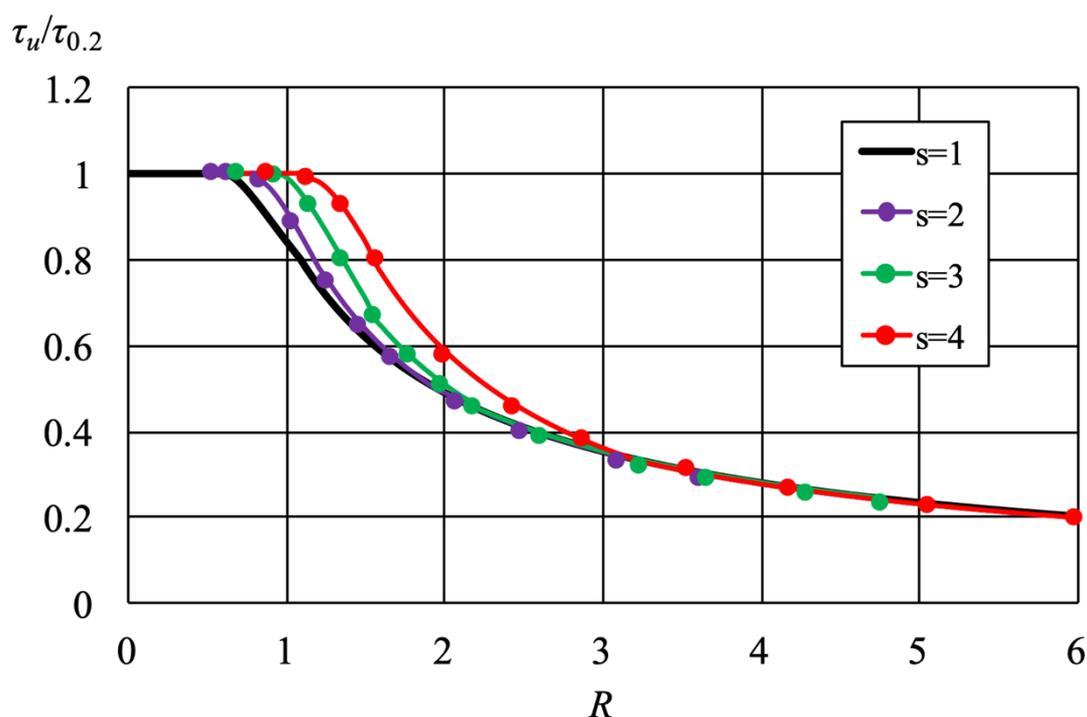


図 3.4  $a/b=8$  に対する縦補剛された長方形板の  $\tau_u/\tau_{0.2}$  と  $R$  の関係

図 3.4 の解析値は次式で近似される。

$$\frac{\tau_u}{\tau_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (R \leq R_1) \\ \frac{a_1}{R} - \frac{a_2}{R^2} - a_3 & (R_1 \leq R < R_2) \\ a_4 \left(\frac{R_2}{R}\right)^{a_5} & (R_2 \leq R < R_3) \\ 0.8 \left(\frac{1.09}{R}\right)^{0.81} & (R_3 \leq R \leq 6.0) \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで、 $R_1 \sim R_3$  および  $a_1 \sim a_5$  は、表 3.5 に示す定数値である。同表の  $s = 1$  は無補剛の長方形板を表す。 $R_1$  は、耐荷力曲線が  $\tau_u/\tau_{0.2}=1.0$  に交差する幅厚比パラメータの値、 $R_2$  は、耐荷力曲線の形状が上向きの曲線から下向きの曲線に変化する幅厚比パラメータの値、 $R_3$  は、

下向きの耐荷力曲線が無補剛の長方形板の耐荷力曲線に重なる幅厚比パラメータの値である。幅厚比パラメータ  $R$  は式(3.3)で定義される。

表 3.5 定数値

| $s$ | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$ | $a_5$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1   | 0.6   | 1.09  | 1.09  | 1.2   | 0.36  | 0     | 0     | 0     |
| 2   | 0.83  | 1.24  | 2     | 2.85  | 1.13  | 0.81  | 0.76  | 0.94  |
| 3   | 0.93  | 1.56  | 2.2   | 3.62  | 1.66  | 0.97  | 0.66  | 1.05  |
| 4   | 1.12  | 1.57  | 3.2   | 5.79  | 3.29  | 1.56  | 0.79  | 1.18  |

式(3.4)で与えられる、曲げ座屈強度に関する最適断面形状を有する長方形板のせん断耐荷力は、長方形板の縦横比  $a/b$  が 8 以下の場合、安全側の値を与える。図 3.2 から分かるように、 $s$  の各値において、 $a/b=4$  の耐荷力から  $a/b=8$  の耐荷力への低下は小さい。したがって、 $a/b=8$  のせん断耐荷力から、 $a/b$  が 8 より大きい長方形板のせん断耐荷力の低下は小さいことが推察される。さらに、実際の桁で、上下フランジと隣接する荷重集中点の垂直補剛材とで囲まれたウェブの縦横比  $a/b$  が 8 を超えることは少ない。

## 第4章 アルミニウム合金桁のせん断耐荷力

### 4.1 アルミニウム合金桁のせん断耐荷力の推定式

無補剛の長方形板のせん断耐荷力を桁のウェブに適用することにより、ウェブが無補剛のアルミニウム合金桁のせん断耐荷力の推定式が与えられた<sup>9)</sup>。そこで、前章で与えられた、縦補剛された長方形板のせん断耐荷力を桁のウェブに適用する。ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁の曲げ耐荷力が $s = 4$ に対して与えられている<sup>11)</sup>。一般に、桁の断面寸法は作用曲げモーメントに対して決定される。したがって、 $s = 4$ でウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁のせん断耐荷力の推定式について検討する。

図4.1を参照して、 $s = 4$ でウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁のせん断耐荷力の推定式が次式で与えられると仮定する。

$$\frac{V_u}{V_Y} = \begin{cases} 1 & (R \leq 1.12) \\ \frac{5.79}{R} - \frac{3.29}{R^2} - 1.56 & (1.12 \leq R < 1.57) \\ 0.79 \left(\frac{1.57}{R}\right)^{1.18} & (1.57 \leq R < 3.2) \\ 0.8 \left(\frac{1.09}{R}\right)^{0.81} & (3.2 \leq R \leq 6.0) \end{cases} \quad (4.1)$$

$$V_Y = \tau_{0.2} b_w t_w = \frac{\sigma_{0.2}}{\sqrt{3}} b_w t_w \quad (4.2)$$

$$R = \frac{1}{\pi} F_L \sqrt{\frac{12(1-\mu^2) \tau_{0.2} b_w}{5.34 + \frac{4b_w^2}{a_L^2} E} \frac{b_w}{t_w}} = \frac{4.728 \times 10^{-2} F_L b_w}{\sqrt{5.34 + \frac{4b_w^2}{a_L^2}} t_w} \quad \begin{matrix} \left(1 \leq \frac{a_L}{b_w}\right) \\ \left(43 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 295\right) \end{matrix} \quad (4.3)$$

$$F_L = 0.0085 \frac{A_w a_L}{A_f b_w} + 0.75 \leq 1 \quad (4.4)$$

ここに、

$V_u$  : 桁のせん断耐荷力

$V_Y$  : ウェブ全体が降伏するときのせん断強度

$\tau_{0.2}$  : せん断応力に関する0.2%耐力 ( $= \sigma_{0.2}/\sqrt{3}$ )

$\sigma_{0.2}$  : 0.2%耐力 (=245MPa)

$A_w$  : 縦補剛材の断面積を含まないウェブの断面積 ( $=b_w t_w$ )

- $b_w$  : ウェブの板幅
- $t_w$  : ウェブの板厚
- $A_f$  : 上下フランジ1枚の断面積
- $a_L$  : 両支持点上の端補剛材の間隔

式(4.1)の右辺は、表3.5の $s = 4$ に対する定数値が式(3.4)に代入されたものである。式(4.3)と式(3.3)の比較から分かるように、アルミニウム合金桁のせん断耐荷力の推定式には係数 $F_L$ が導入されている。この係数は、ウェブが無補剛のアルミニウム合金桁のせん断耐荷力を与えるために誘導されたもので<sup>9)</sup>、ウェブの縦横比 $a_L/b_w$ およびウェブとフランジの断面積比 $A_w/A_f$ が大きくなるに従って、ウェブのせん断座屈強度が4辺固定支持のせん断座屈強度から4辺単純支持のせん断座屈強度に近づくことを反映させるための係数である。

表3.2の $s = 4$ の $t_r/t$ と $b/t$ の関係式より、 $s = 4$ で縦補剛されたウェブの断面形状は次式で与えられる。

$$\frac{t_r}{t_w} = 0.574 \left( \frac{b_w}{t_w} - 12.5 \right)^{0.15} \quad \left( 43 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 295 \right) \quad (4.5)$$

$$\frac{b_r}{t_r} = 6.28 \quad (4.6)$$

- ここに、  
 $b_r$  : 縦補剛材の板幅  
 $t_r$  : 縦補剛材の板厚

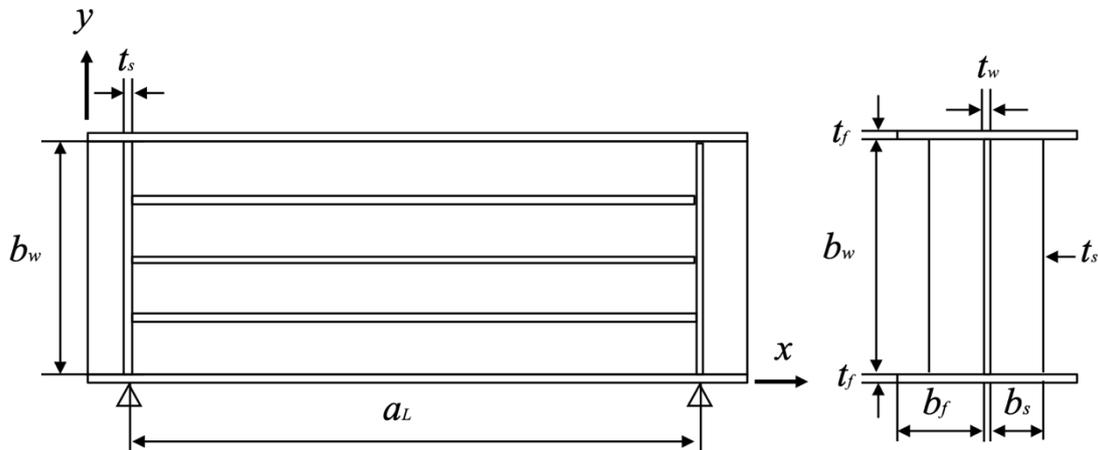


図4.1 ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁

## 4.2 桁の断面寸法

有限要素法による弾塑性有限変位解析を行う桁の断面寸法および支持点上の端補剛材の断面寸法を表4.1に示す。ウェブのパネル数は4で、桁の断面形状は上下対称である。ウェブの縦横比 $a_L/b_w$ は8とする。

表4.1 桁の断面寸法

| $A_w/A_f$ | $R$ | $b_w/t_w$ | $b_w$<br>(mm) | $t_w$<br>(mm) | $b_r$<br>(mm) | $t_r$<br>(mm) | $b_f$<br>(mm) | $t_f$<br>(mm) | $b_s$<br>(mm) | $t_s$<br>(mm) |
|-----------|-----|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1         | 1   | 60.1      | 600           | 10.0          | 64.1          | 10.2          | 134.4         | 21.4          | 157           | 25            |
|           | 1.5 | 90.1      |               | 6.7           | 45.8          | 7.3           | 110.5         | 17.6          | 125.6         | 20            |
|           | 2   | 120.2     |               | 5.0           | 36.4          | 5.8           | 95.5          | 15.2          | 94.2          | 15            |
|           | 3   | 180.3     |               | 3.3           | 25.7          | 4.1           | 78.5          | 12.5          | 81.6          | 13            |
|           | 4   | 240.4     |               | 2.5           | 20.1          | 3.2           | 67.8          | 10.8          | 62.8          | 10            |
|           | 4.9 | 294.5     |               | 2.0           | 17.0          | 2.7           | 61.5          | 9.8           | 31.4          | 5             |
| 4         | 1   | 49.2      |               | 12.2          | 75.4          | 12.0          | 72.8          | 11.6          | 157           | 25            |
|           | 1.5 | 73.7      |               | 8.1           | 54.6          | 8.7           | 59.7          | 9.5           | 125.6         | 20            |
|           | 2   | 98.3      |               | 6.1           | 42.7          | 6.8           | 52.1          | 8.3           | 94.2          | 15            |
|           | 3   | 147.5     |               | 4.1           | 30.8          | 4.9           | 42.7          | 6.8           | 81.6          | 13            |
|           | 4   | 196.6     |               | 3.1           | 23.9          | 3.8           | 37.1          | 5.9           | 62.8          | 10            |
|           | 6   | 294.9     |               | 2.0           | 17.0          | 2.7           | 30.1          | 4.8           | 31.4          | 5             |

表4.1の $b_f$ ,  $t_f$ ,  $b_s$ ,  $t_s$ は、図4.1を参照して次の通りである。

$b_f$  : フランジの片側の板幅

$t_f$  : フランジの板厚

$b_s$  : 端補剛材の片側の板幅

$t_s$  : 端補剛材の板厚

$a_L/b_w=8$ として、 $A_w/A_f=1$ と4について、式(4.3)より、 $R$ の各値に対して $b_w/t_w$ の値が求まる。 $b_w=600\text{mm}$ として $t_w$ の値を定める。 $b_w/t_w$ の値を式(4.5)に代入して $t_r$ が求まり、さらに式(4.6)より $b_r$ が求まる。

せん断を受ける桁は、実際には曲げも受ける。したがって、曲げ圧縮を受けるフランジが局部座屈を起こさないようにするために、フランジの片側を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フランジの幅厚比を設定する。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であり<sup>13)</sup>、フランジの片側の幅厚比 $\beta_f$ が次式で与えられる。

$$\beta_f = 0.6\pi \sqrt{\frac{0.425}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} \quad (4.7)$$

アルミニウム合金のヤング係数  $E$  が 70GPa, ポアソン比  $\mu$  が 0.3 であり, A6061-T6 の 0.2% 耐力  $\sigma_{0.2}$  が 245MPa であるので,  $\beta_f=6.28$  を得る.

$\beta_f$ を用いて片側のフランジの板幅  $b_f$  は次式で与えられる.

$$b_f = \beta_f t_f \quad (4.8)$$

他方, フランジの断面積  $A_f$ は次式で与えられる.

$$A_f = t_f(2b_f + t_w) \quad (4.9)$$

式(4.8)を式(4.9)に代入して次式を得る.

$$2\beta_f t_f^2 + t_w t_f - A_f = 0 \quad (4.10)$$

$A_w/A_f$ の所定の値に対して,  $A_w$ に対応する  $A_f$ を求め, これと  $t_w$ を式(4.10)に代入して  $t_f$ を計算する.  $t_f$ を式(4.8)に代入して  $b_f$ を求める.

支持点上に設けられる端補剛材の設計は, 道路橋示方書<sup>17)</sup>における, 荷重集中点の垂直補剛材の設計に従って, 支点反力を圧縮力として受ける柱として設計する. 図 4.2 に示すように, 柱としての有効断面積に端補剛材の両側  $12t_w$ までのウェブの断面積を含め, 柱の有効座屈長をウェブ高  $b_w$ の 1/2 とする. 支点反力に対して桁のせん断耐荷力を採用する.

以上に基づいて, 端補剛材の断面寸法は次式を満足するように設計する.

$$\sigma \leq \sigma_u \quad (4.11)$$

ここに,  $\sigma$  : 端補剛材および両側  $12t_w$ のウェブから成る柱に生じる圧縮応力

$\sigma_u$  : 端補剛材および両側  $12t_w$ のウェブから成る柱の圧縮耐荷力

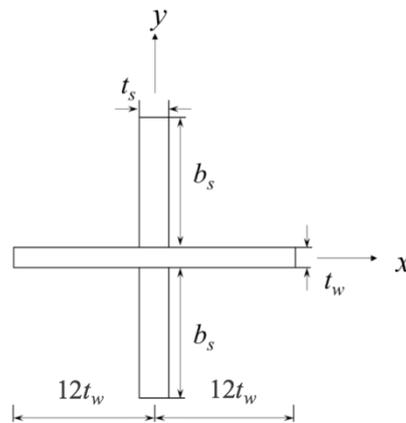


図 4.2 有効断面積

圧縮応力  $\sigma$  は次式で与えられる.

$$\sigma = \frac{V_u}{24t_w^2 + 2b_s t_s} \quad (4.12)$$

ここに,  $V_u$  : 桁のせん断耐荷力

$V_u$  は式(4.1)によって与えられる.

アルミニウム合金 A6061-T6 の柱部材に対する圧縮耐荷力は次式で与えられる<sup>15)</sup>.

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq 0.13) \\ 1.01 - 0.03\lambda - 0.3\lambda^2 - 0.04\lambda^3 + 0.05\lambda^4 & (0.13 \leq \lambda \leq 2) \end{cases} \quad (4.13)$$

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{0.5 \times 600}{r} = \frac{5.6494}{r} \quad (4.14)$$

ここに,  $\lambda$  : 柱部材の細長比パラメータ

$\sigma_{0.2}$  : 0.2%耐力 (=245MPa)

$E$  : ヤング係数 (=70GPa)

$r$  : 柱部材の断面二次半径

柱部材の断面二次半径  $r$  は次式で与えられる.

$$r = \min(r_x, r_y) \quad (4.15)$$

ここに,

$$r_x = \sqrt{\frac{(2b_s + t_w)^3 t_s + t_w^3 (24t_w - t_s)}{12(24t_w^2 + 2b_s t_s)}} \quad (4.16)$$

$$r_y = \sqrt{\frac{(24t_w)^3 t_w + 2t_s^3 b_s}{12(24t_w^2 + 2b_s t_s)}} \quad (4.17)$$

圧縮を受ける端補剛材が局部座屈しないような断面寸法を端補剛材に与える. したがって, 前述のフランジの場合と同様な考えに従って,  $b_s$  と  $t_s$  は次の関係をもつ.

$$\frac{b_s}{t_s} = 6.28 \quad (4.18)$$

### 4.3 FEMによる弾塑性有限変位解析

表 4.1 に示す断面寸法を有する、ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁のせん断耐荷力を FEM による弾塑性有限変位解析によって算出する。アルミニウム合金 A6061-T6 の応力-ひずみ関係に対して式(2.17)と(2.18)を用いる。アルミニウム合金桁のウェブの面外方向の初期たわみに対して次式を仮定する。

$$w_0 = \frac{b_w}{250} \sin\left(\frac{3\pi x}{a_L}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_w + t_f}\right) \quad (4.19)$$

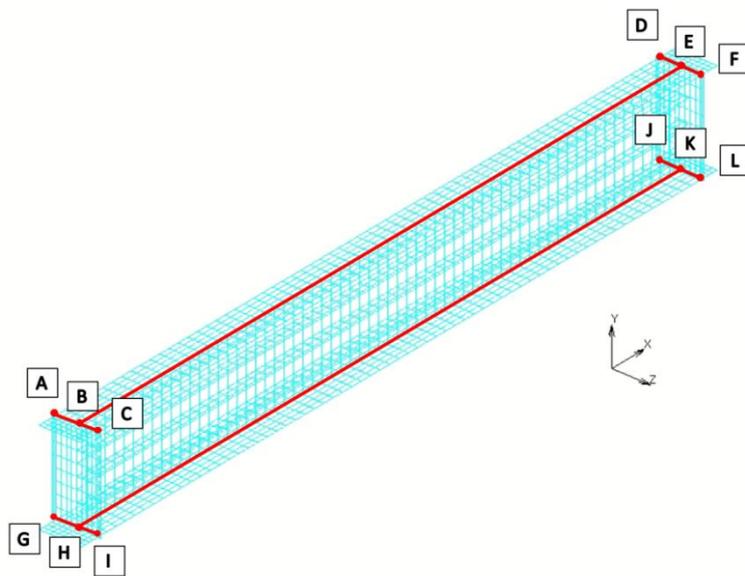
ここに、 $w_0$  : ウェブの面外方向の初期たわみ

式(4.19)の  $x$  軸方向と  $y$  軸方向の初期たわみモードは、表 3.4 の  $a/b = 8$  で、 $s = 4$  に対する  $m = 3$ 、 $n = 1$  に対応している。

有限要素法解析における境界条件を表 4.2 に示す。支承上の辺 GI と JL に対して  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸方向の変位を固定し、ウェブと上下フランジが交差する辺 BE と HK は横移動しないように  $z$  軸方向の変位を固定する。さらに、辺 HK の  $x$  軸方向の変位を固定し、辺 BE に強制変位  $d_u$  を  $x$  軸方向に与える。縦補剛材の端は端補剛材に連結しない。辺上の回転角は自由とする。

表 4.2 境界条件

|            | 変位         |         |         |
|------------|------------|---------|---------|
|            | $x$ 軸方向    | $y$ 軸方向 | $z$ 軸方向 |
| 辺 BE       | 強制変位 $d_u$ | 自由      | 固定      |
| 辺 HK       | 固定         | 自由      | 固定      |
| 辺 GI, 辺 JL | 固定         | 固定      | 固定      |



汎用有限要素法解析プログラム MARC<sup>16)</sup>を用いて弾塑性有限変位解析を行う。有限要素として 8 節点シェル要素 (MARC における要素番号 22) を用いる。曲げ圧縮を受けるフランジに対して、フランジの全幅方向を 4 等分割以上とすれば十分な精度の解析値が得られることが示されている<sup>7)</sup>。そこで、フランジと端補剛材に共有節点を持たせることを考慮して、フランジの全幅方向を 8 から 24 の間で等分割する。端補剛材は圧縮を受けるフランジと同様な部材とみなせるので、片側の端補剛材の板幅方向を 4 から 8 の間で等分割する。ウェブの要素分割は 2.2.5 項と同じである。縦補剛されたアルミニウム合金桁の要素分割の一例を図 4.4 に示す。端補剛材から外側の張出しの長さは  $12t_w$  としている。

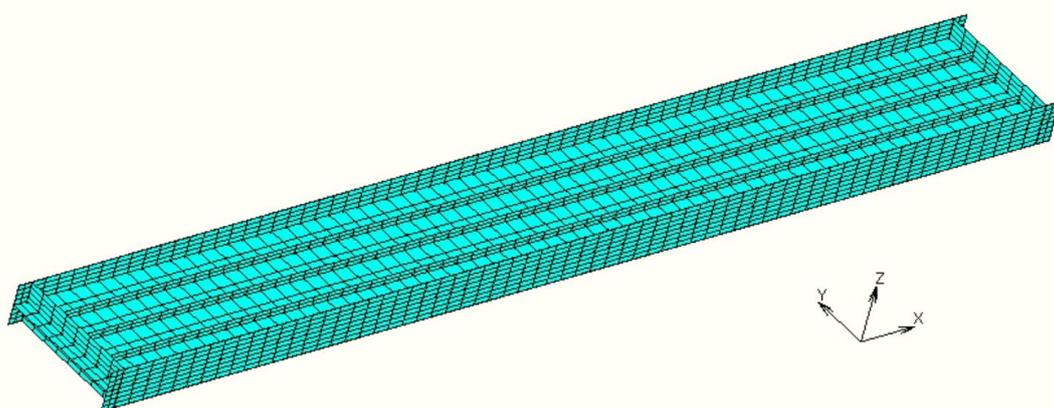


図 4.4 ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁の要素分割

#### 4.4 耐荷力曲線と解析値の比較

ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁の  $V_u/V_y$  と  $R$  の関係を図 4.5 に示す。せん断耐荷力  $V_u$  は、FEM 解析で生じる支点反力の最大値である。数値データを付録 D に示す。図中の耐荷力曲線は式(4.1)で与えられる。 $R$  が 3 以上では、解析値は耐荷力曲線よりかなり高い位置にある。 $R$  が 3 以下では、解析値は耐荷力曲線より高いが、耐荷力曲線に近い位置にある。実際に使用される、ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁のウェブ幅厚比  $b_w/t_w$  は最大で 150 程度と想定する。 $b_w/t_w$  が 150 以下の場合、表 4.1 より、ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁の  $R$  は 3 以下である。したがって、 $R$  が 3 以上の解析値を耐荷力曲線に近づけるために、式(4.4)で与えられる係数  $F_L$  を修正する必要はないと考える。

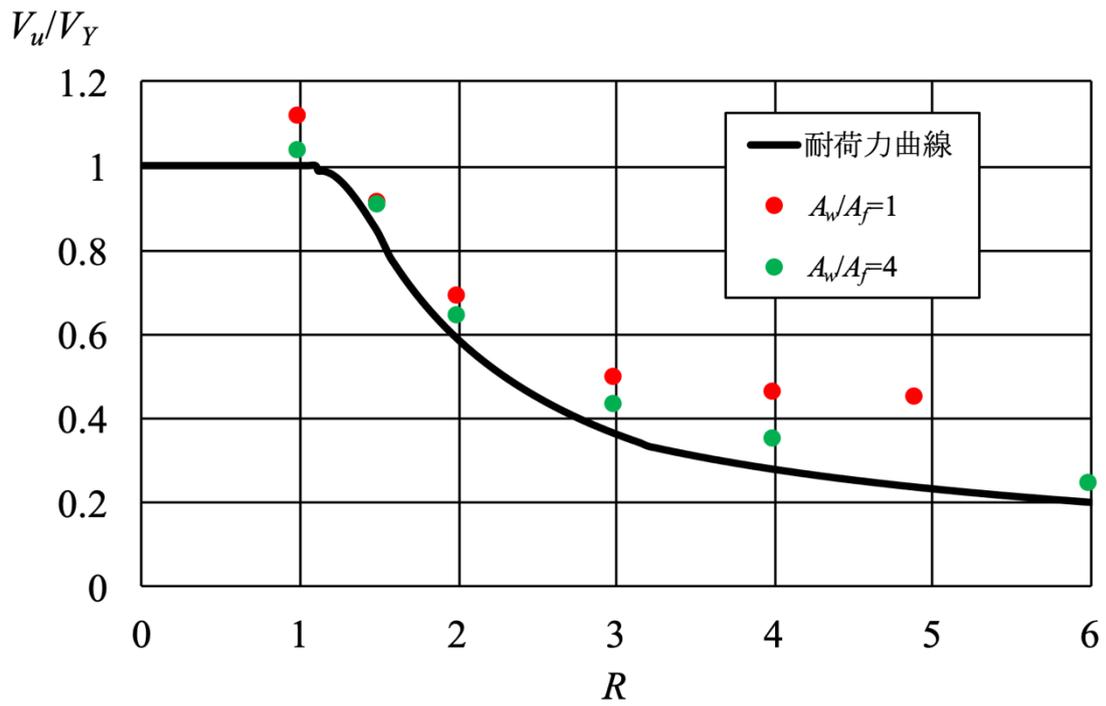
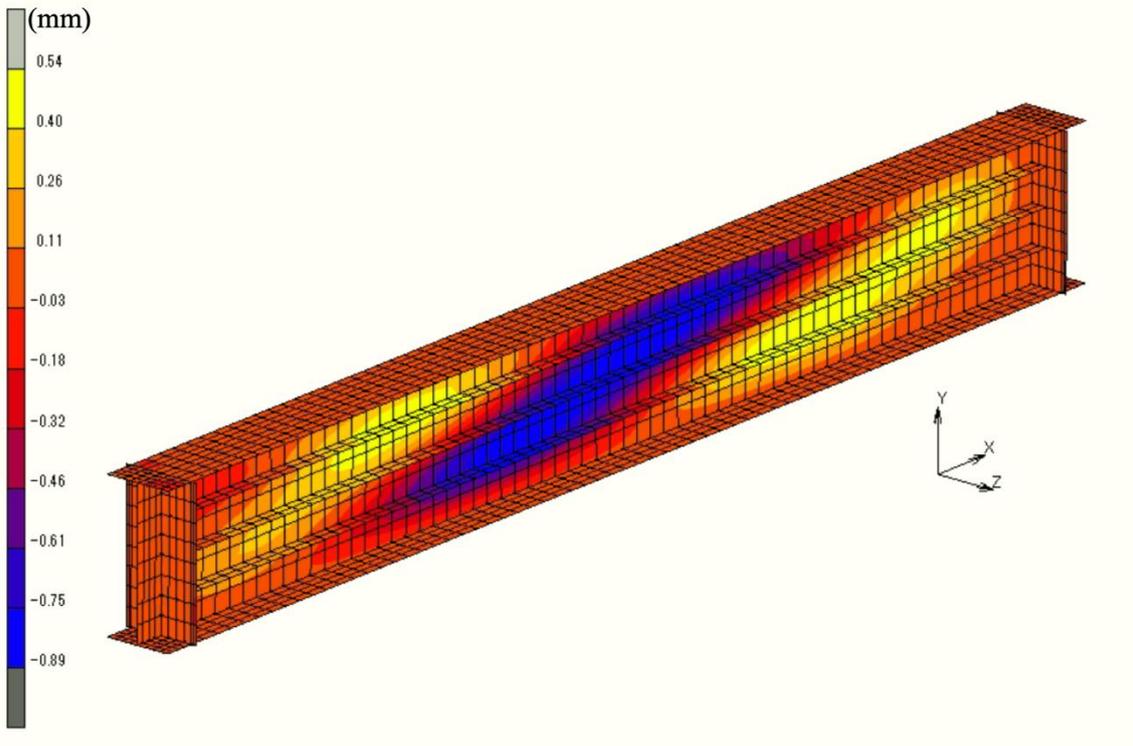
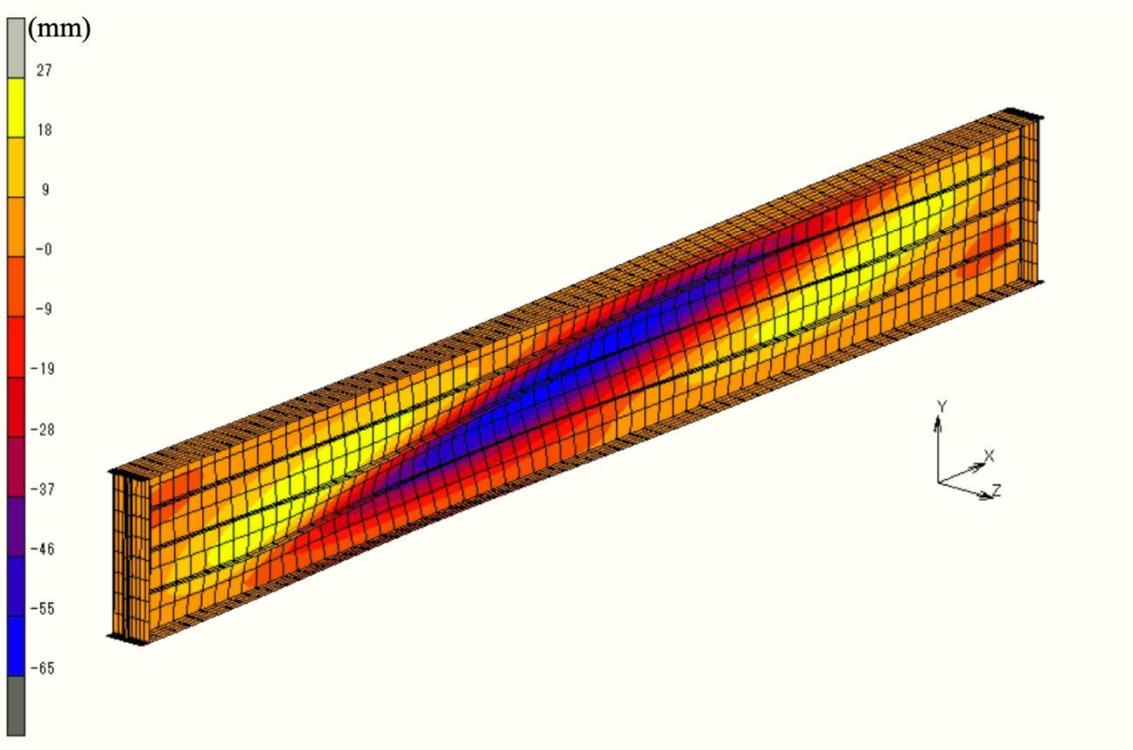


図 4.5  $V_u/V_Y$  と  $R$  の関係

ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁の終局時の変形の例を図 4.6 に示す。縦補剛材とウェブが一体となって面外変形を起こしていることが分かる。

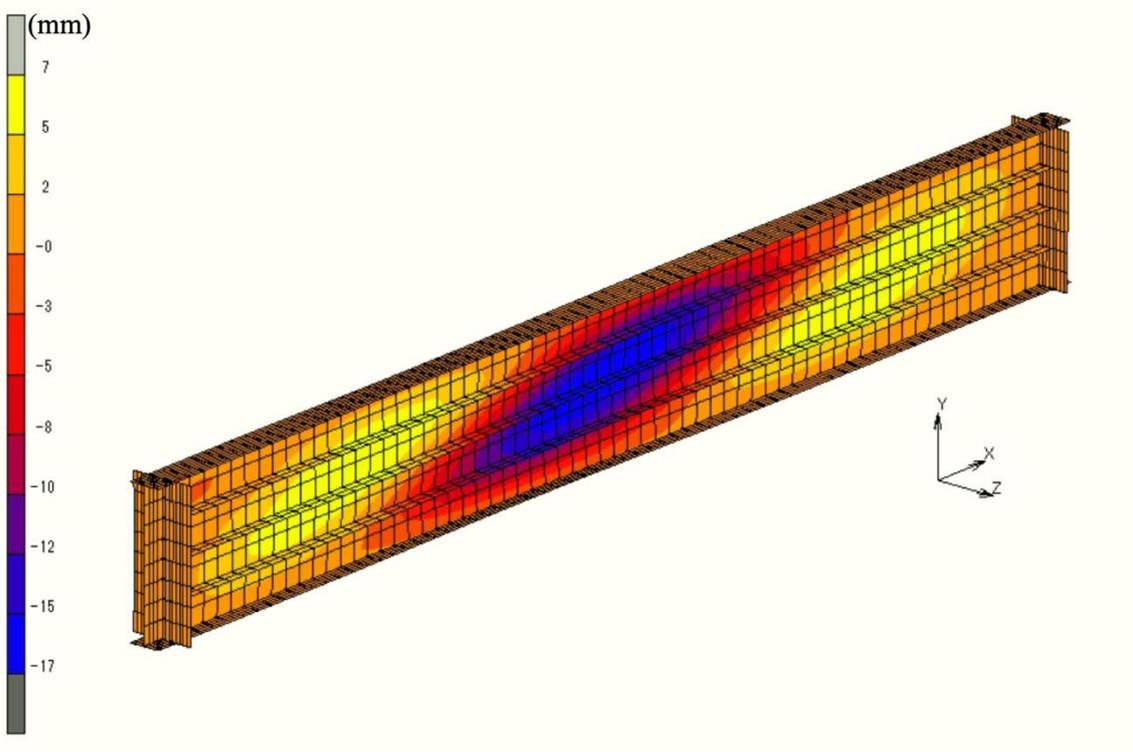


(a)  $R=1.5$

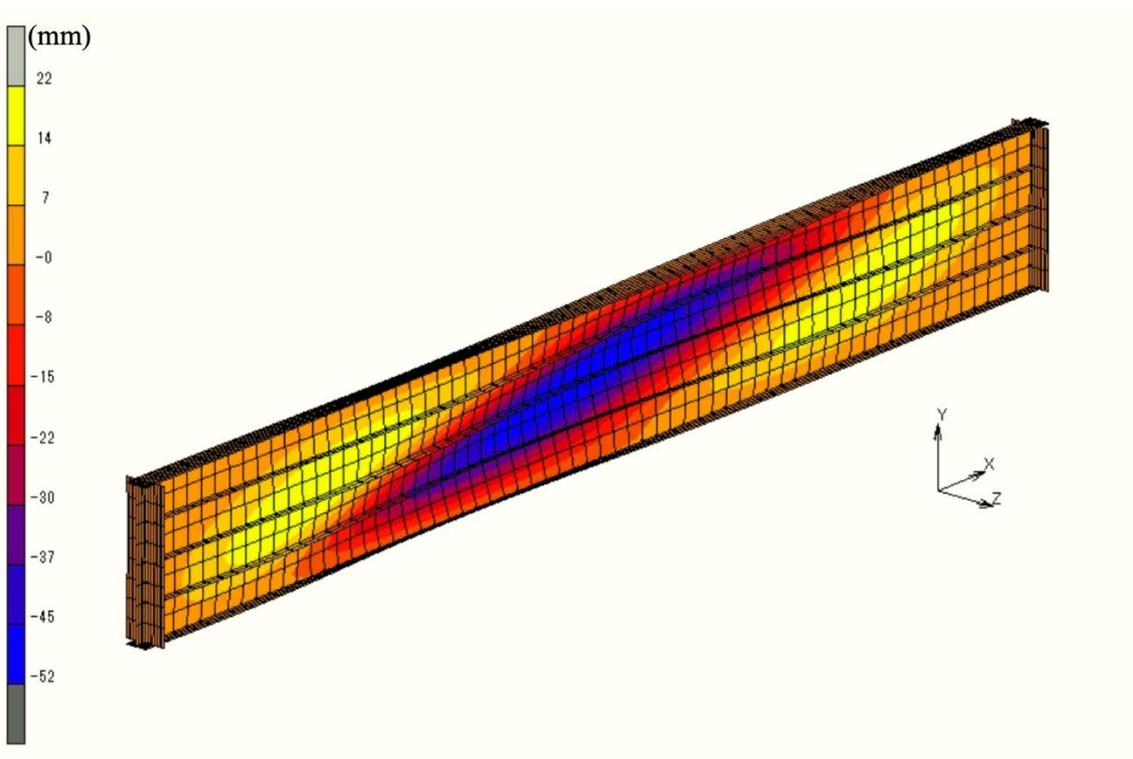


(b)  $R=3.0$

(A)  $A_w/A_f=1$



(a)  $R=1.5$



(b)  $R=3.0$

(B)  $A_w/A_f=4$

図 4.6 ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁の終局時の変形

## 第5章 結論

本研究では，ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金 A6061-T6 桁のせん断耐荷力の推定式を与えた．主な結論は次の通りである．

- (1) 縦補剛された長方形板の座屈係数[式(2.3)参照]が導入された幅厚比パラメータ  $R$ [式(2.23)参照]によって評価されたせん断耐荷力は縦補剛材剛比  $\gamma_s$  の値によって変動する．したがって，式(2.23)で定義された幅厚比パラメータ  $R$ によって耐荷力曲線を統一的に表すことはできない．
- (2) 面内曲げを受ける，縦補剛された長方形板の座屈強度を最大にするような断面形状，すなわち曲げ座屈強度に関する最適断面形状を有する長方形板に対して，そのせん断耐荷力を次式で与えた．

$$\frac{\tau_u}{\tau_{0.2}} \left\{ \begin{array}{ll} 1 & (R \leq R_1) \\ \frac{a_1}{R} - \frac{a_2}{R^2} - a_3 & (R_1 \leq R < R_2) \\ a_4 \left(\frac{R_2}{R}\right)^{a_5} & (R_2 \leq R < R_3) \\ 0.8 \left(\frac{1.09}{R}\right)^{0.81} & (R_3 \leq R \leq 6.0) \end{array} \right.$$

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)\tau_{0.2} b}{5.34 + \frac{4b^2}{a^2}} \frac{b}{E t}} = \frac{4.728 \times 10^{-2} b}{\sqrt{5.34 + \frac{4b^2}{a^2}} t} \quad \left(1 \leq \frac{a}{b}\right)$$

ここに， $\tau_u$  : せん断耐荷力  
 $\tau_{0.2}$  : せん断応力に関する 0.2%耐力 (=141.5MPa)  
 $\mu$  : ポアソン比 (=0.3)  
 $E$  : ヤング係数 (=70GPa)  
 $a$  : 長方形板の長さ  
 $b$  : 長方形板の板幅  
 $t$  : 長方形板の板厚

$R_1 \sim R_3$  および  $a_1 \sim a_5$  は，表 5.1 に示す定数値である．ここで，同表の  $s$  はパネル数である．

表 5.1 定数値

| $s$ | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$ | $a_5$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2   | 0.83  | 1.24  | 2     | 2.85  | 1.13  | 0.81  | 0.76  | 0.94  |
| 3   | 0.93  | 1.56  | 2.2   | 3.62  | 1.66  | 0.97  | 0.66  | 1.05  |
| 4   | 1.12  | 1.57  | 3.2   | 5.79  | 3.29  | 1.56  | 0.79  | 1.18  |

表 5.1 の各パネル数  $s$  に対する、曲げ座屈強度に関する最適断面形状を表 5.2 に示す。

表 5.2  $t_r/t$  と  $b/t$  の関係式

| $s$ | $t_r/t$ と $b/t$ の関係式   | $b/t$ の適用範囲                    |
|-----|--|--------------------------------|
| 2   | $\frac{t_r}{t} = 0.180 \left( \frac{b}{t} - 0.85 \right)^{0.25}$ | $26 \leq \frac{b}{t} \leq 178$ |
| 3   | $\frac{t_r}{t} = 0.337 \left( \frac{b}{t} - 4.37 \right)^{0.20}$ | $34 \leq \frac{b}{t} \leq 234$ |
| 4   | $\frac{t_r}{t} = 0.574 \left( \frac{b}{t} - 12.5 \right)^{0.15}$ | $43 \leq \frac{b}{t} \leq 295$ |

注記  $b$  : 長方形板の板幅,  $t$  : 長方形板の板厚,  $t_r$  : 縦補剛材の板厚

さらに、縦補剛材の板幅  $b_r$  は次式で与えられる。

$$b_r = 6.28t_r$$

- (3) 前項で述べた、曲げ座屈強度に関する最適断面形状を有する、縦補剛された長方形板のせん断耐荷力は、幅厚比パラメータ  $R$  が大きくなると、無補剛の長方形板のせん断耐荷力と等しくなる。すなわち、幅厚比パラメータ  $R$  が大きくなるに従って、耐荷力に対する縦補剛材の効果は小さくなり、その効果はなくなる。
- (4) パネル数が 4 でウェブが縦補剛されたアルミニウム合金桁のせん断耐荷力の推定式を次式で与えた。

$$\frac{V_u}{V_Y} = \begin{cases} 1 & (R \leq 1.12) \\ \frac{5.79}{R} - \frac{3.29}{R^2} - 1.56 & (1.12 \leq R < 1.57) \\ 0.79 \left( \frac{1.57}{R} \right)^{1.18} & (1.57 \leq R < 3.2) \\ 0.8 \left( \frac{1.09}{R} \right)^{0.81} & (3.2 \leq R \leq 6.0) \end{cases}$$

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

$$R = \frac{1}{\pi} F_L \sqrt{\frac{12(1-\mu^2) \tau_{0.2} b_w}{5.34 + \frac{4b_w^2}{a_L^2} E} \frac{b_w}{t_w}} = \frac{4.728 \times 10^{-2} F_L b_w}{\sqrt{5.34 + \frac{4b_w^2}{a_L^2}} t_w} \quad \left( 1 \leq \frac{a_L}{b_w} \right)$$

$$\left( 43 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 295 \right)$$

$$F_L = 0.0085 \frac{A_w a_L}{A_f b_w} + 0.75 \leq 1 \quad \left( 1 \leq \frac{A_w}{A_f} \leq 4 \right)$$

- ここに、  
 $V_u$  : 桁のせん断耐荷力  
 $V_Y$  : ウェブ全体が降伏するときのせん断強度  
 $\tau_{0.2}$  : せん断応力に関する 0.2%耐力 (=141.5MPa)  
 $b_w$  : ウェブの板幅  
 $t_w$  : ウェブの板厚  
 $a_L$  : 両支持点上の端補剛材の間隔  
 $A_w$  : ウェブの断面積 (=  $b_w t_w$ )  
 $A_f$  : 上下フランジ1枚の断面積

パネル数が 4 で縦補剛されたウェブの断面形状は次式で与えられる。

$$\frac{t_r}{t_w} = 0.574 \left( \frac{b_w}{t_w} - 12.5 \right)^{0.15} \quad \left( 43 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 295 \right)$$

$$\frac{b_r}{t_r} = 6.28$$

ここに、 $b_r$  : 縦補剛材の板幅、 $t_r$  : 縦補剛材の板厚

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

## 参考文献

- 1) 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，Vol.50，No.3，pp.26-30，2016.
- 3) 鈴木勝，玉越隆史，沢田道彦：緊急仮設橋の開発について，橋梁と基礎，建設図書，Vol.49，No.11，pp.46-51，2015.
- 4) 飛沫帯の栈橋でアルミ床版を供用，日経コンストラクション，10/09号，p.25，2017.
- 5) 大倉一郎，北村幸嗣，赤崎圭輔，卯瀧高久，ビッグ・ラズロ・ゲルゲリ，三河克己：新しいアルミニウム合金製補剛桁の提案，構造工学論文集，Vol.51A，pp.203-210，2005.
- 6) 大倉一郎，小笠原康二：接合位置と板幅がアルミニウム合金板の曲げ耐荷力に与える影響，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.68，No.2，pp.287-299，2012.
- 7) 鳥畑一博，大倉一郎：曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力，構造工学論文集，Vol.62A，pp.93-101，2016.
- 8) 大倉一郎，寺川勝大：面内せん断を受けるアルミニウム長方形板の耐荷力，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.69，No.3，pp.491-504，2013.
- 9) 山中誠矢，大倉一郎：せん断力を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力，ALST 研究レポート，No.49，2017.
- 10) 清水弘樹，大倉一郎：面内曲げを受ける縦補剛されたアルミニウム合金板の最適断面形状と耐荷力，ALST 研究レポート，No.52，2018.
- 11) 清水弘樹，大倉一郎：ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金 A6061-T6 桁の曲げ耐荷力，ALST 研究レポート，No.53，2019.
- 12) 前田貴公，大倉一郎：縦補剛されたアルミニウム合金板のせん断耐荷力，ALST 研究レポート，No.44，2016.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) MSC.Software Corporation: Marc Mentat 2018.0.0.
- 17) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，pp.327-328，2012.

付録 A 図 2.6, 2.7, 2.8 の数値データ

表 A.1  $\tau_u/\tau_{0.2}$  の値 (図 2.6)

(a)  $s=2$

| $R$ | $\gamma^s$ |       |       |       |       |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|
|     | 5          | 10    | 25    | 50    | 80    |
| 0.6 | 0.994      | 0.995 | 0.995 | 0.995 | 0.994 |
| 0.8 | 0.930      | 0.942 | 0.951 | 0.947 | 0.939 |
| 0.9 | 0.873      | 0.886 | 0.899 | 0.894 | 0.883 |
| 1   | 0.811      | 0.825 | 0.838 | 0.833 | 0.820 |
| 1.1 | 0.752      | 0.762 | 0.776 | 0.773 | 0.760 |
| 1.2 | 0.701      | 0.705 | 0.718 | 0.716 | 0.704 |
| 1.6 | 0.555      | 0.550 | 0.549 | 0.546 | 0.537 |
| 2   | 0.463      | 0.456 | 0.449 | 0.442 | 0.433 |
| 2.5 | 0.385      | 0.377 | 0.368 | 0.360 | 0.352 |
| 3   | 0.332      | 0.326 | 0.316 | 0.307 | 0.299 |

(b)  $s=3$

| $R$ | $\gamma^s$ |       |       |       |       |       |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 5          | 10    | 25    | 50    | 100   | 200   |
| 0.6 | 0.995      | 0.991 | 0.991 | 0.991 | 0.991 | 0.992 |
| 0.8 | 0.938      | 0.939 | 0.941 | 0.943 | 0.946 | 0.944 |
| 0.9 | 0.879      | 0.892 | 0.891 | 0.894 | 0.895 | 0.890 |
| 1   | 0.813      | 0.840 | 0.836 | 0.835 | 0.834 | 0.825 |
| 1.1 | 0.746      | 0.791 | 0.784 | 0.781 | 0.777 | 0.766 |
| 1.2 | 0.686      | 0.743 | 0.734 | 0.729 | 0.722 | 0.708 |
| 1.6 | 0.528      | 0.595 | 0.578 | 0.564 | 0.552 | 0.534 |
| 2   | 0.433      | 0.494 | 0.486 | 0.461 | 0.448 | 0.429 |
| 2.5 | 0.357      | 0.388 | 0.395 | 0.379 | 0.366 | 0.349 |
| 3   | 0.306      | 0.304 | 0.341 | 0.327 | 0.315 | 0.301 |

(c)  $s=4$ 

| $R$ | $\gamma^s$ |       |       |       |       |       |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 5          | 10    | 25    | 50    | 100   | 200   |
| 0.6 | 0.991      | 0.990 | 0.993 | 0.991 | 0.990 | 0.990 |
| 0.8 | 0.915      | 0.926 | 0.946 | 0.952 | 0.947 | 0.941 |
| 0.9 | 0.850      | 0.868 | 0.900 | 0.914 | 0.900 | 0.886 |
| 1   | 0.780      | 0.805 | 0.842 | 0.867 | 0.845 | 0.825 |
| 1.1 | 0.713      | 0.745 | 0.780 | 0.819 | 0.791 | 0.765 |
| 1.2 | 0.654      | 0.692 | 0.721 | 0.772 | 0.740 | 0.712 |
| 1.6 | 0.502      | 0.543 | 0.544 | 0.614 | 0.579 | 0.549 |
| 2   | 0.411      | 0.449 | 0.442 | 0.502 | 0.474 | 0.447 |
| 2.5 | 0.339      | 0.372 | 0.365 | 0.414 | 0.392 | 0.371 |
| 3   | 0.292      | 0.316 | 0.315 | 0.356 | 0.339 | 0.323 |

表 A. 2  $\tau_u/\tau_{0.2}$  の値 (図 2. 7)(a)  $s=2$ 

| $R$ | $\gamma^s$ |       |       |       |       |       |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 5          | 10    | 25    | 50    | 100   | 200   |
| 0.6 | 0.997      | 0.997 | 0.997 | 0.997 | 0.999 | 0.999 |
| 0.8 | 0.957      | 0.959 | 0.966 | 0.973 | 0.990 | 0.987 |
| 0.9 | 0.901      | 0.903 | 0.914 | 0.930 | 0.954 | 0.949 |
| 1   | 0.832      | 0.832 | 0.844 | 0.862 | 0.901 | 0.894 |
| 1.1 | 0.762      | 0.759 | 0.764 | 0.780 | 0.834 | 0.825 |
| 1.2 | 0.702      | 0.695 | 0.694 | 0.704 | 0.763 | 0.753 |
| 1.6 | 0.543      | 0.533 | 0.520 | 0.514 | 0.553 | 0.545 |
| 2   | 0.450      | 0.442 | 0.429 | 0.419 | 0.439 | 0.434 |
| 2.5 | 0.374      | 0.368 | 0.359 | 0.350 | 0.355 | 0.353 |
| 3   | 0.319      | 0.312 | 0.307 | 0.303 | 0.299 | 0.300 |

(b)  $s=3$ 

| $R$ | $\gamma^s$ |       |       |       |       |       |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 5          | 10    | 25    | 50    | 100   | 200   |
| 0.6 | 0.998      | 0.998 | 0.998 | 0.999 | 0.999 | 0.999 |
| 0.8 | 0.968      | 0.971 | 0.977 | 0.992 | 0.988 | 0.985 |
| 0.9 | 0.918      | 0.922 | 0.937 | 0.960 | 0.951 | 0.948 |
| 1   | 0.854      | 0.859 | 0.875 | 0.907 | 0.898 | 0.898 |
| 1.1 | 0.787      | 0.788 | 0.799 | 0.845 | 0.837 | 0.841 |
| 1.2 | 0.726      | 0.722 | 0.726 | 0.777 | 0.770 | 0.776 |
| 1.6 | 0.558      | 0.548 | 0.534 | 0.534 | 0.556 | 0.556 |
| 2   | 0.459      | 0.449 | 0.433 | 0.448 | 0.438 | 0.434 |
| 2.5 | 0.382      | 0.374 | 0.359 | 0.365 | 0.358 | 0.352 |
| 3   | 0.332      | 0.325 | 0.312 | 0.313 | 0.308 | 0.301 |

(c)  $s=4$ 

| $R$ | $\gamma^s$ |       |       |       |       |       |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 5          | 10    | 25    | 50    | 100   | 200   |
| 0.6 | 0.998      | 0.998 | 0.998 | 0.999 | 0.999 | 0.999 |
| 0.8 | 0.968      | 0.971 | 0.978 | 0.991 | 0.987 | 0.984 |
| 0.9 | 0.917      | 0.922 | 0.937 | 0.957 | 0.948 | 0.947 |
| 1   | 0.854      | 0.859 | 0.876 | 0.904 | 0.897 | 0.900 |
| 1.1 | 0.788      | 0.789 | 0.801 | 0.843 | 0.838 | 0.847 |
| 1.2 | 0.728      | 0.726 | 0.731 | 0.777 | 0.777 | 0.791 |
| 1.6 | 0.562      | 0.553 | 0.543 | 0.572 | 0.574 | 0.587 |
| 2   | 0.462      | 0.454 | 0.440 | 0.453 | 0.452 | 0.459 |
| 2.5 | 0.387      | 0.378 | 0.365 | 0.371 | 0.368 | 0.371 |
| 3   | 0.337      | 0.329 | 0.317 | 0.322 | 0.319 | 0.319 |

表 A. 3  $\tau_u/\tau_{0.2}$  の値 (図 2. 8)

(a)  $s=2$

| $R$ | $\gamma^s$ |       |       |       |       |       |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 5          | 10    | 25    | 50    | 100   | 200   |
| 0.6 | 0.998      | 0.998 | 0.998 | 0.998 | 0.998 | 0.999 |
| 0.8 | 0.963      | 0.964 | 0.979 | 0.982 | 0.991 | 0.987 |
| 0.9 | 0.908      | 0.910 | 0.932 | 0.932 | 0.938 | 0.947 |
| 1   | 0.836      | 0.837 | 0.859 | 0.873 | 0.877 | 0.875 |
| 1.1 | 0.761      | 0.758 | 0.772 | 0.771 | 0.778 | 0.770 |
| 1.2 | 0.695      | 0.704 | 0.693 | 0.693 | 0.701 | 0.679 |
| 1.4 | 0.595      | 0.597 | 0.574 | 0.577 | 0.569 | 0.548 |
| 1.6 | 0.524      | 0.514 | 0.495 | 0.493 | 0.483 | 0.465 |
| 1.8 | 0.471      | 0.470 | 0.440 | 0.435 | 0.422 | 0.408 |
| 2   | 0.429      | 0.419 | 0.398 | 0.391 | 0.378 | 0.366 |
| 2.5 | 0.354      | 0.345 | 0.323 | 0.316 | 0.302 | 0.294 |
| 3   | 0.302      | 0.295 | 0.271 | 0.264 | 0.251 | 0.244 |

(b)  $s=3$

| $R$ | $\gamma^s$ |       |       |       |       |       |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 5          | 10    | 25    | 50    | 100   | 200   |
| 0.6 | 0.998      | 0.999 | 0.999 | 0.998 | 0.999 | 0.999 |
| 0.8 | 0.971      | 0.986 | 0.983 | 0.982 | 0.989 | 0.985 |
| 0.9 | 0.920      | 0.943 | 0.940 | 0.941 | 0.954 | 0.943 |
| 1   | 0.854      | 0.875 | 0.872 | 0.873 | 0.886 | 0.867 |
| 1.1 | 0.781      | 0.796 | 0.789 | 0.786 | 0.792 | 0.765 |
| 1.2 | 0.714      | 0.720 | 0.710 | 0.704 | 0.700 | 0.672 |
| 1.4 | 0.611      | 0.604 | 0.589 | 0.579 | 0.567 | 0.542 |
| 1.6 | 0.537      | 0.523 | 0.496 | 0.495 | 0.479 | 0.457 |
| 1.8 | 0.482      | 0.465 | 0.449 | 0.436 | 0.420 | 0.401 |
| 2   | 0.439      | 0.422 | 0.405 | 0.392 | 0.377 | 0.360 |
| 2.5 | 0.362      | 0.346 | 0.329 | 0.316 | 0.304 | 0.291 |
| 3   | 0.284      | 0.297 | 0.276 | 0.264 | 0.254 | 0.242 |

(c)  $s=4$ 

| $R$ | $\gamma^s$ |       |       |       |       |       |
|-----|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 5          | 10    | 25    | 50    | 100   | 200   |
| 0.6 | 0.998      | 0.998 | 0.999 | 0.998 | 0.999 | 0.999 |
| 0.8 | 0.971      | 0.986 | 0.984 | 0.983 | 0.990 | 0.986 |
| 0.9 | 0.920      | 0.942 | 0.940 | 0.941 | 0.954 | 0.944 |
| 1   | 0.853      | 0.855 | 0.871 | 0.872 | 0.885 | 0.869 |
| 1.1 | 0.781      | 0.795 | 0.788 | 0.785 | 0.791 | 0.767 |
| 1.2 | 0.716      | 0.720 | 0.710 | 0.704 | 0.701 | 0.677 |
| 1.4 | 0.613      | 0.606 | 0.591 | 0.582 | 0.574 | 0.565 |
| 1.6 | 0.540      | 0.531 | 0.511 | 0.500 | 0.485 | 0.466 |
| 1.8 | 0.484      | 0.468 | 0.453 | 0.441 | 0.425 | 0.409 |
| 2   | 0.441      | 0.424 | 0.409 | 0.396 | 0.377 | 0.367 |
| 2.5 | 0.363      | 0.347 | 0.334 | 0.322 | 0.312 | 0.300 |
| 3   | 0.311      | 0.299 | 0.285 | 0.274 | 0.268 | 0.256 |

## 付録 B 解析対象の断面寸法

(a)  $s=2$

| $b/t_{em}$ | $b/t$<br>(mm) | $b$<br>(mm) | $t$<br>(mm) | $b_r$<br>(mm) | $t_r$<br>(mm) |
|------------|---------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| 25         | 26.1          | 600         | 23.0        | 57.8          | 9.2           |
| 30         | 31.1          |             | 19.3        | 50.2          | 8.0           |
| 40         | 41.2          |             | 14.5        | 40.8          | 6.5           |
| 50         | 51.3          |             | 11.7        | 34.5          | 5.5           |
| 60         | 61.4          |             | 9.8         | 30.1          | 4.8           |
| 70         | 71.5          |             | 8.4         | 27.0          | 4.3           |
| 80         | 81.6          |             | 7.3         | 24.5          | 3.9           |
| 100        | 101.8         |             | 5.9         | 20.7          | 3.3           |
| 120        | 122.0         |             | 4.9         | 18.2          | 2.9           |
| 150        | 152.3         |             | 3.9         | 15.1          | 2.4           |
| 175        | 177.6         |             | 3.4         | 13.8          | 2.2           |

(b)  $s=3$

| $b/t_{em}$ | $b/t$<br>(mm) | $b$<br>(mm) | $t$<br>(mm) | $b_r$<br>(mm) | $t_r$<br>(mm) |
|------------|---------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| 29         | 34.4          | 600         | 17.5        | 72.2          | 11.5          |
| 40         | 45.7          |             | 13.1        | 57.1          | 9.1           |
| 50         | 56.1          |             | 10.7        | 49.0          | 7.8           |
| 60         | 66.4          |             | 9.0         | 42.7          | 6.8           |
| 70         | 76.7          |             | 7.8         | 38.3          | 6.1           |
| 80         | 87.1          |             | 6.9         | 34.5          | 5.5           |
| 90         | 97.4          |             | 6.2         | 31.4          | 5.0           |
| 100        | 107.8         |             | 5.6         | 28.9          | 4.6           |
| 120        | 128.4         |             | 4.7         | 25.1          | 4.0           |
| 150        | 159.5         |             | 3.8         | 21.4          | 3.4           |
| 170        | 180.1         |             | 3.3         | 19.5          | 3.1           |
| 200        | 211.2         |             | 2.8         | 17.0          | 2.7           |
| 222        | 233.9         |             | 2.6         | 15.7          | 2.5           |

(c)  $s=4$ 

| $b/t_{em}$ | $b/t$<br>(mm) | $b$<br>(mm) | $t$<br>(mm) | $b_r$<br>(mm) | $t_r$<br>(mm) |
|------------|---------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| 29         | 43.6          | 600         | 13.8        | 82.9          | 13.2          |
| 40         | 55.4          |             | 10.8        | 68.5          | 10.9          |
| 50         | 66.2          |             | 9.1         | 59.0          | 9.4           |
| 60         | 76.9          |             | 7.8         | 52.8          | 8.4           |
| 80         | 98.4          |             | 6.1         | 42.7          | 6.8           |
| 100        | 119.8         |             | 5.0         | 36.4          | 5.8           |
| 120        | 141.3         |             | 4.2         | 31.4          | 5.0           |
| 150        | 173.5         |             | 3.5         | 26.4          | 4.2           |
| 180        | 205.7         |             | 2.9         | 23.2          | 3.7           |
| 220        | 248.6         |             | 2.4         | 19.5          | 3.1           |
| 263        | 294.7         |             | 2.0         | 17.0          | 2.7           |

付録 C 図 3.2 の数値データ

(a)  $s=2$

| $a/b=1$ |                     | $a/b=4$ |                     | $a/b=8$ |                     |
|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|
| $R$     | $\tau_u/\tau_{0.2}$ | $R$     | $\tau_u/\tau_{0.2}$ | $R$     | $\tau_u/\tau_{0.2}$ |
| 0.40    | 0.999               | 0.52    | 0.999               | 0.53    | 0.999               |
| 0.48    | 0.999               | 0.62    | 0.999               | 0.63    | 0.998               |
| 0.64    | 0.998               | 0.82    | 0.985               | 0.84    | 0.983               |
| 0.79    | 0.980               | 1.03    | 0.898               | 1.04    | 0.885               |
| 0.95    | 0.916               | 1.23    | 0.775               | 1.25    | 0.750               |
| 1.11    | 0.839               | 1.43    | 0.675               | 1.46    | 0.644               |
| 1.26    | 0.762               | 1.63    | 0.601               | 1.66    | 0.568               |
| 1.58    | 0.642               | 2.04    | 0.496               | 2.07    | 0.465               |
| 1.89    | 0.557               | 2.44    | 0.426               | 2.48    | 0.398               |
| 2.36    | 0.466               | 3.05    | 0.355               | 3.10    | 0.328               |
| 2.75    | 0.412               | 3.55    | 0.313               | 3.61    | 0.288               |

注記：  $a/b$  の各列の  $R$  の値は、付録 B の表 (a) の  $b/t_{em}$  の値に対応する。

(b)  $s=3$ 

| $a/b=1$ |                     | $a/b=4$ |                     | $a/b=8$ |                     |
|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|
| $R$     | $\tau_u/\tau_{0.2}$ | $R$     | $\tau_u/\tau_{0.2}$ | $R$     | $\tau_u/\tau_{0.2}$ |
| 0.53    | 0.999               | 0.69    | 0.999               | 0.70    | 0.999               |
| 0.71    | 0.998               | 0.91    | 0.991               | 0.93    | 0.992               |
| 0.87    | 0.995               | 1.12    | 0.940               | 1.14    | 0.924               |
| 1.03    | 0.987               | 1.33    | 0.830               | 1.35    | 0.801               |
| 1.19    | 0.963               | 1.53    | 0.711               | 1.56    | 0.666               |
| 1.35    | 0.920               | 1.74    | 0.621               | 1.77    | 0.573               |
| 1.51    | 0.867               | 1.95    | 0.556               | 1.98    | 0.507               |
| 1.67    | 0.811               | 2.16    | 0.503               | 2.19    | 0.457               |
| 1.99    | 0.715               | 2.57    | 0.430               | 2.61    | 0.388               |
| 2.47    | 0.599               | 3.19    | 0.360               | 3.24    | 0.316               |
| 2.79    | 0.542               | 3.60    | 0.327               | 3.66    | 0.289               |
| 3.27    | 0.473               | 4.22    | 0.289               | 4.30    | 0.253               |
| 3.62    | 0.435               | 4.68    | 0.264               | 4.76    | 0.230               |

注記： $a/b$ の各列の $R$ の値は、付録Bの表(b)の $b/t_{em}$ の値に対応する。

(c)  $s=4$ 

| $a/b=1$ |                     | $a/b=4$ |                     | $a/b=8$ |                     |
|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|
| $R$     | $\tau_u/\tau_{0.2}$ | $R$     | $\tau_u/\tau_{0.2}$ | $R$     | $\tau_u/\tau_{0.2}$ |
| 0.68    | 1.000               | 0.87    | 0.999               | 0.89    | 0.998               |
| 0.86    | 0.999               | 1.11    | 0.997               | 1.13    | 0.988               |
| 1.02    | 0.998               | 1.32    | 0.970               | 1.35    | 0.927               |
| 1.19    | 0.995               | 1.54    | 0.897               | 1.56    | 0.799               |
| 1.52    | 0.983               | 1.97    | 0.714               | 2.00    | 0.574               |
| 1.85    | 0.943               | 2.40    | 0.568               | 2.44    | 0.452               |
| 2.19    | 0.873               | 2.83    | 0.469               | 2.87    | 0.381               |
| 2.68    | 0.760               | 3.47    | 0.384               | 3.53    | 0.312               |
| 3.18    | 0.664               | 4.11    | 0.333               | 4.18    | 0.266               |
| 3.85    | 0.560               | 4.97    | 0.288               | 5.06    | 0.226               |
| 4.56    | 0.480               | 5.89    | 0.252               | 6.00    | 0.197               |

注記： $a/b$ の各列の $R$ の値は、付録Bの表(c)の $b/t_{em}$ の値に対応する。

付録 D 図 4.5 の数値データ

(a)  $A_w/A_f=1$

| $R$ | $V_u/V_Y$ |
|-----|-----------|
| 1   | 1.117     |
| 1.5 | 0.911     |
| 2   | 0.688     |
| 3   | 0.495     |
| 4   | 0.456     |
| 4.9 | 0.444     |

(b)  $A_w/A_f=4$

| $R$ | $V_u/V_Y$ |
|-----|-----------|
| 1   | 1.033     |
| 1.5 | 0.906     |
| 2   | 0.639     |
| 3   | 0.428     |
| 4   | 0.345     |
| 6   | 0.239     |