

中間垂直補剛材を有する
アルミニウム合金 A5083-O 桁のせん断耐荷力

ALST 研究レポート 56

2019 年 9 月

大阪大学大学院工学研究科

岩倉弘幸, 大倉一郎

概要

本研究は、有限要素法による弾塑性有限変位解析によって、中間垂直補剛材を有するアルミニウム合金 A5083-O 桁のせん断耐荷力を明らかにし、その推定式を与える。

目次

第 1 章 序論	・・・1
第 2 章 解析モデル	・・・3
2.1 桁の設計	・・・3
2.2 端補剛材の設計	・・・4
2.3 中間垂直補剛材の設計	・・・6
第 3 章 有限要素法による弾塑性有限変位解析	・・・8
3.1 応力-ひずみ関係	・・・8
3.2 境界条件	・・・8
3.3 初期たわみと溶接残留応力	・・・9
3.4 要素分割	・・・10
第 4 章 せん断耐荷力	・・・13
4.1 中間垂直補剛材を持たない桁のせん断耐荷力	・・・13
4.2 係数 F	・・・14
4.3 耐荷力曲線と解析値の比較	・・・17
第 5 章 結論	・・・21
参考文献	・・・24
付録 A 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁の断面寸法と耐荷力	・・・25
付録 B 終局時の桁ウェブの面外変形	・・・28

第 1 章 序論

図 1.1 に示すように、アルミニウム合金桁の構造は、使用されるアルミニウム合金の種類によって異なる。図 1.1(a) に示す A5083-O 桁は主に歩道橋に使用され、その製作方法は鋼桁のそれと同様で、A5083-O の圧延板を MIG 溶接による隅肉溶接で連結することにより製作される。道路橋は歩道橋より規模が大きく、歩道橋に比べて設計荷重が格段に大きくなるので、道路橋の桁に対しては、0.2% 耐力が高い A6061-T6 が使用される。しかし、A6061-T6 は熱処理によって 0.2% 耐力が高められているので、MIG 溶接を施すと溶接部の 0.2% 耐力が母材のその約半分まで低下する。したがって、図 1.1(a) に示す桁を A6061-T6 を用いて MIG 溶接によって製作した場合、垂直補剛材が存在する位置で MIG 溶接がウェブを横断するので、桁全体としての強度が低下する。そこで、A6061-T6 が桁に用いられる場合には、図 1.1(b) に示す、押出型材を摩擦攪拌接合によって突合せ接合し、ウェブが等間隔に縦補剛された桁が開発された^{1),2)}。この桁には垂直補剛材がなく、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。

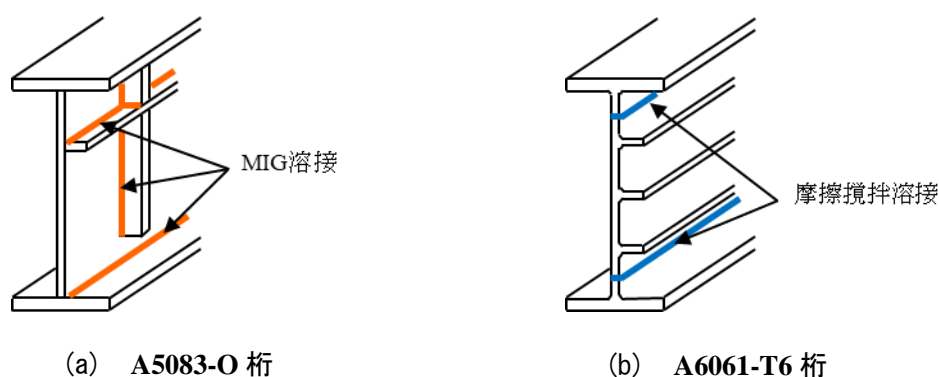


図 1.1 アルミニウム合金桁

図 1.1(b) に示す A6061-T6 桁において、桁端に端補剛材を設ける場合、上下フランジおよびウェブに端補剛材を連結するために MIG 溶接を用いると、溶接部が強度低下を起こす。さらに、端補剛材をウェブに MIG 溶接する際、ウェブに既に施された摩擦攪拌接合の上に MIG 溶接による隅肉溶接が行われるので、隅肉溶接が摩擦攪拌接合に交差する部分の品質を明らかにする必要がある。他方、A6061-T6 桁において、端補剛材の連結に高力ボルト摩擦接合継手を用いると、端補剛材を上下フランジに連結する高力ボルトの頭がフランジ表面に出ないように工夫が必要となる。

これらの問題を解決する方法として、図 1.2 に示すように、溶接による強度低下が起こらない A5083-O 桁を支承上に配置し、これと A6061-T6 桁を高力ボルト摩擦接合継手によって連結する異種アルミニウム合金桁が考えられる。桁端に近づくに従って大きくなるせん

断力に対して、A5083-O 桁の中間垂直補剛材の間隔を狭くすることによって対処することができる。さらに、支間長の短い小規模の道路橋であれば、A5083-O 桁のみで設計が可能となる場合もある。

中間垂直補剛材を持たない A5083-O 桁のせん断耐荷力がこれまでに明らかにされているが³⁾、中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁のせん断耐荷力は未だ明らかにされていない。本研究は、有限要素法による弾塑性有限変位解析によって、中間垂直補剛材を有するアルミニウム合金 A5083-O 桁のせん断耐荷力を明らかにし、その推定式を与えることを目的とする。

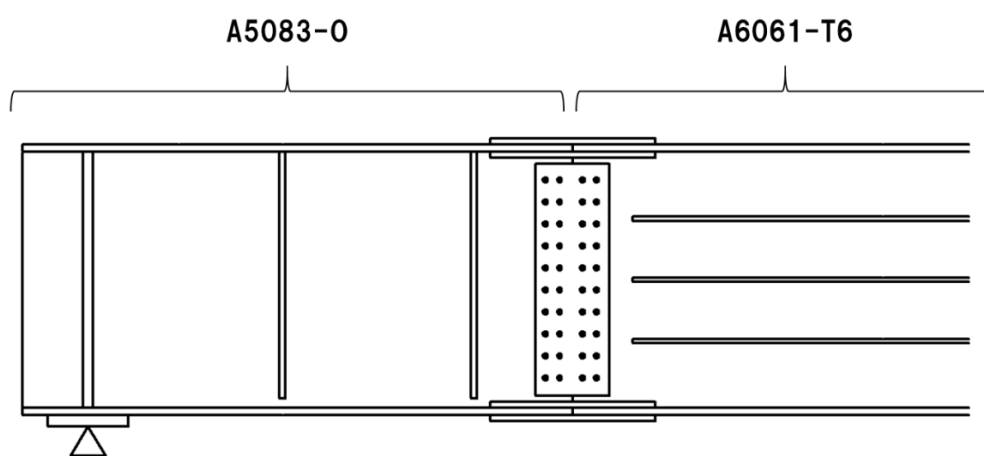


図 1.2 異種アルミニウム合金桁

第 2 章 解析モデル

2.1 桁の設計

本研究で扱う解析モデルを図 2.1 に示す。解析モデルは、端補剛材間の長さがウェブの板幅の 6 倍の桁であり、桁の断面形状は上下対称である。

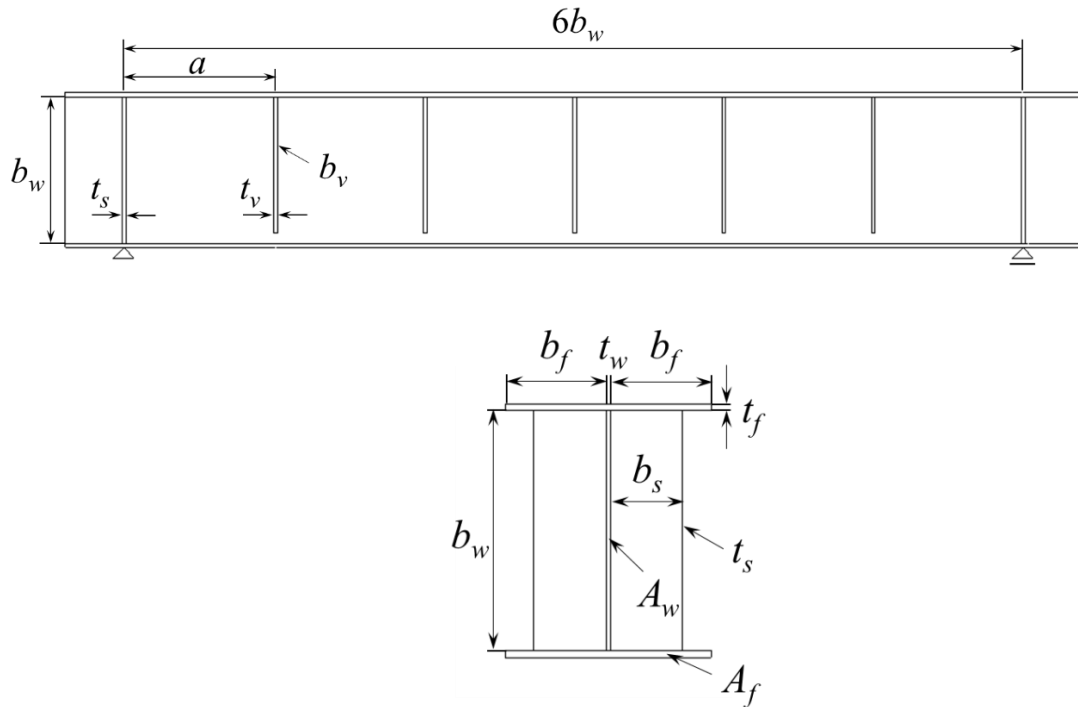


図 2.1 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁

図 2.1 の記号の意味を次に述べる。

a	: 隣接する中間垂直補剛材の間隔
b_w	: ウェブの板幅
t_w	: ウェブの板厚
b_f	: フランジの片側の板幅
t_f	: フランジの板厚
b_s	: 片側の端補剛材の板幅
t_s	: 端補剛材の板厚
b_v	: 中間垂直補剛材の板幅
t_v	: 中間垂直補剛材の板厚
A_w	: ウェブの断面積
A_f	: 上下フランジ 1 枚の断面積

隣接する中間垂直補剛材間のパネルの縦横比 a/b_w に対して 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, ウェブの幅厚比 b_w/t_w に対して 50, 90, 150, 220 を考慮する. $b_w/t_w = 220$ は, A5083-O 桁の曲げ耐荷力推定式におけるウェブ幅厚比の上限値である⁴⁾. ウェブとフランジの断面積比 A_w/A_f に対して 1, 2, 3, 4 を考慮する. これらのパラメータの組合せに対して 80 ケースを考慮する (付録A参照).

フランジが局部座屈しないようにするために, 片側のフランジを自由突出板とみなし, 次式に示すように, 片側のフランジの幅厚比 b_f/t_f を 5.87 に設定する.

$$\frac{b_f}{t_f} = \pi \sqrt{\frac{0.425}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} R = 5.87 \quad (2.1)$$

ここに, R : 自由突出板が 0.2%耐力を維持する限界の幅厚比パラメータの値⁵⁾ (=0.4)
 E : ヤング率 (=70GPa)
 μ : ポアソン比 (=0.3)
 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力 (=125MPa)

2.2 端補剛材の設計

桁端に設けられる端補剛材の設計は, 道路橋示方書⁶⁾における, 荷重集中点の垂直補剛材の設計に従って, 図 2.2 に示すように, 圧縮力を受ける柱として設計する. 図 2.3 に示すように, 端補剛材の断面積および端補剛材の両側 $12t_w$ までのウェブの断面積を柱としての有効断面積とする. ただし, 有効断面積は端補剛材の断面積の 1.7 倍以下とする. 柱の有効座屈長をウェブの板幅 b_w の 1/2 とする. これらの条件下で, 端補剛材は次式を満足しなければならない.

$$\sigma \leq \sigma_u \quad (2.2)$$

ここに, σ : 有効断面積を有する柱に生じる圧縮応力
 σ_u : 有効断面積を有する柱の圧縮耐荷力

端補剛材に作用させる圧縮力として, ウェブ全体が降伏するときのせん断強度を用いる. これに対して端補剛材に生じる圧縮応力 σ は次式で与えられる.

$$\sigma = \frac{V_Y}{24t_w^2 + 2b_s t_s} = \frac{\tau_{0.2} b_w t_w}{24t_w^2 + 2b_s t_s} = \frac{\sigma_{0.2} b_w t_w}{\sqrt{3}(24t_w^2 + 2b_s t_s)} \quad (2.3)$$

ここに, V_Y : ウェブ全体が降伏するときのせん断強度
 $\tau_{0.2}$: 0.2%せん断耐力 (= $\sigma_{0.2}/\sqrt{3} = 72.2\text{MPa}$)
 b_w : ウェブの板幅
 t_w : ウェブの板厚
 b_s : 片側の端補剛材の板幅
 t_s : 端補剛材の板厚

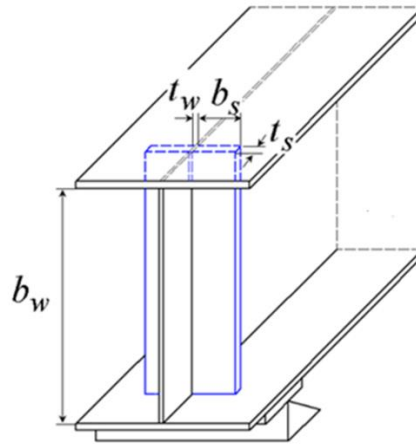


図 2.2 端補剛材

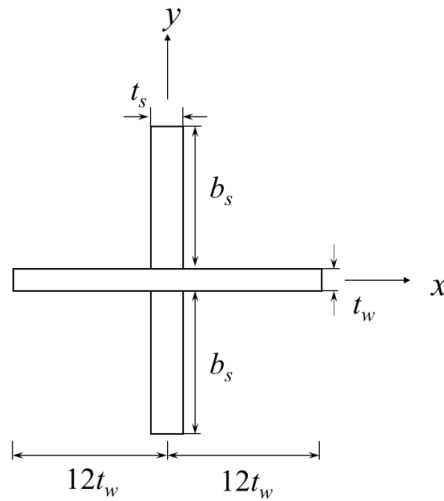


図 2.3 有効断面積

有効断面積には次の条件が課せられる.

$$24t_w^2 + 2b_s t_s \leq 1.7 \times 2b_s t_s \quad (2.4)$$

アルミニウム合金 A5083-O の圧縮耐荷力は次式で与えられる⁷⁾.

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq 0.09) \\ 1 + 0.1\lambda - 1.13\lambda^2 + 0.72\lambda^3 - 0.14\lambda^4 & (0.09 \leq \lambda \leq 2) \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{0.2}}{E}} \frac{0.5 \times b_w}{r} = \frac{5.3804}{r} \quad (2.6)$$

ここに、 λ : 有効断面積を有する柱の細長比パラメータ
 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力 (=125MPa)
 E : ヤング率 (=70GPa)

b_w : ウェブの板幅 (=800mm)
 r : 有効断面積を有する柱の断面の回転半径

有効断面積を有する柱の断面の回転半径 r は次式で与えられる.

$$r = \min(r_x, r_y) \quad (2.7)$$

ここに,

$$r_x = \sqrt{\frac{(2b_s + t_w)^3 t_s}{12(24t_w^2 + 2b_s t_s)}} \quad (2.8)$$

$$r_y = \sqrt{\frac{(24t_w)^3 t_w}{12(24t_w^2 + 2b_s t_s)}} = \sqrt{\frac{1152t_w^4}{(24t_w^2 + 2b_s t_s)}} \quad (2.9)$$

圧縮を受ける端補剛材が局部座屈しないようにするために、片側の端補剛材を自由突出板とみなし、前節で述べたように、片側の端補剛材の幅厚比 b_s/t_s を 5.87 に設定する.

端補剛材の断面寸法に対して、式(2.2)と(2.4)のどちらかの式において等号が成立する場合の値を用いる. 式(2.2)は t_s に関して非線形になるので、繰返し計算によって t_s の値を求める. 端補剛材の断面寸法を付録 A に示す. 同付録において、*が付された b_s と t_s の値は、式(2.4)の等号が成立したことを表している.

2.3 中間垂直補剛材の設計

道路橋示方書⁶⁾においては、 $a/b_w \leq 1.5$ に対して、中間垂直補剛材の断面二次モーメント I_v が次式を満たすことを規定している.

$$I_v = \frac{t_v b_v^3}{3} \geq \frac{b_w t_w^3}{11} \gamma \quad (2.10)$$

ここに,

$$\gamma = 8.0 \left(\frac{b_w}{a} \right)^2 \quad (2.11)$$

中間垂直補剛材が局部座屈しないようにするために、中間垂直補剛材を自由突出板とみなし、2.1 節で述べたように、中間垂直補剛材の幅厚比 b_v/t_v を 5.87 に設定する. この条件と式(2.10)で等号が成立する場合に対して中間垂直補剛材の断面寸法を決定する. さらに、式(2.10)が $a/b_w \leq 2.0$ まで適用できると仮定する. 中間垂直補剛材の断面寸法を付録 A に示す.

道路橋示方書⁶⁾においては、中間垂直補剛材と下フランジに適切な間隔を開けて取り付けることが規定されている. 有限要素法解析では、シェル要素が用いられているため、板厚の存在を考慮することができない. したがって、図 2.4 に示すように、中間垂直補剛材の下端と下フランジの中央面との間を 40mm 程開ける.

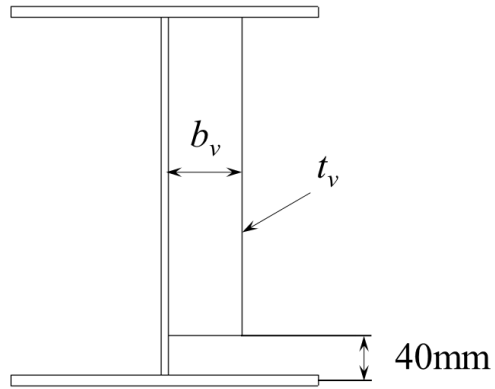


図 2.4 中間垂直補剛材の下端と下フランジの中央面との間隔

第3章 有限要素法による弾塑性有限変位解析

3.1 応力-ひずみ関係

アルミニウム合金材の応力-ひずみ関係に対して次式で与えられる関係を使用する⁸⁾。

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

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

アルミニウム合金 A5083-O の 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ に対して 125MPa, ひずみ硬化パラメータ n に対して 5.3 を用いる。 $\sigma_{0.2}$ の値は, 日本工業規格で規定される 0.2%耐力であり⁹⁾, ひずみ硬化パラメータ n の値は, 引張試験の結果に確率統計学的処理を施すことによって得られた非超過確率 5%に対する値である⁸⁾。

3.2 境界条件

図 3.1 を参照して, 有限要素法解析における境界条件を表 3.1 に示す。支承上の辺 GI と JL に対して x, y, z 軸方向の変位を拘束し, ウェブと上下フランジが交差する辺 BE と HK は横移動しないように z 軸方向の変位を拘束する。さらに, 辺 HK の x 軸方向の変位を拘束し, 辺 BE に強制変位 d_u を x 軸方向に与える。各辺上の回転角は自由とする。

表 3.1 境界条件

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

注: 0 と 1 は, それぞれ自由と拘束を表す。

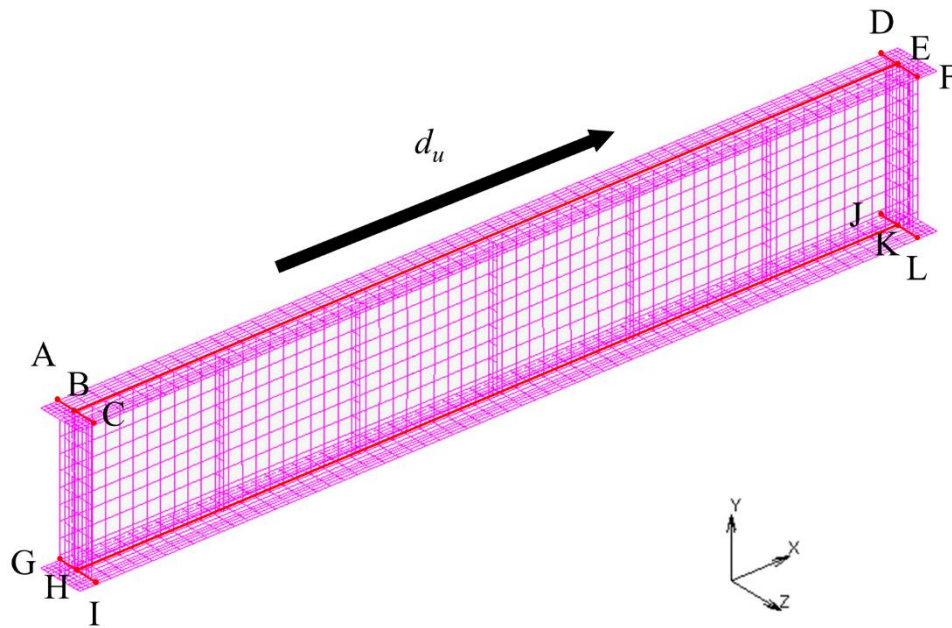


図 3.1 表 3.1 の参照図

3.3 初期たわみと溶接残留応力

図 3.2 を参照して，隣接する中間垂直補剛材間のウェブパネルの面外方向の初期たわみ w_0 に対して次式を仮定する．

$$w_0 = \frac{b_w}{250} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_w + t_f}\right) \quad (3.2)$$

式(3.2)の初期たわみを各ウェブパネルに正負交番させる．最大初期たわみ $b_w/250$ は，アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）⁷⁾ で規定される桁ウェブの製作精度である．

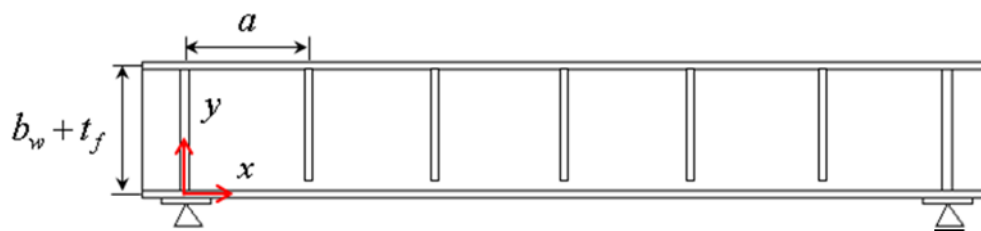


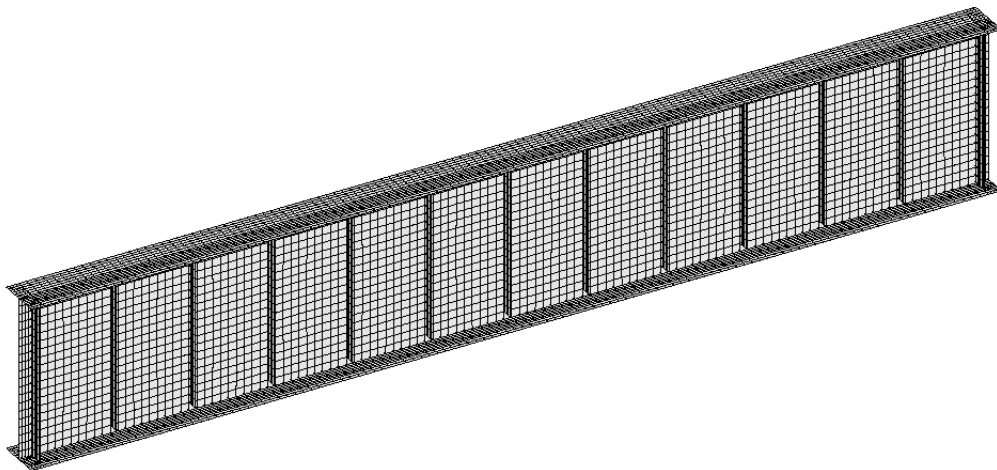
図 3.2 ウェブの初期たわみ

溶接残留応力は長方形板のせん断耐荷力にほとんど影響しないことが明らかにされているので¹⁰⁾，溶接残留応力は解析で考慮しない．

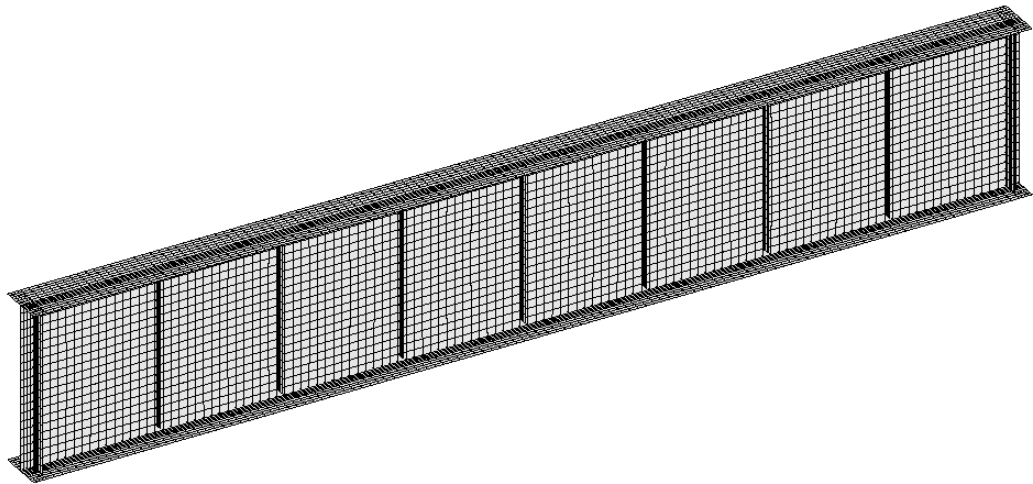
3.4 要素分割

汎用有限要素法解析プログラム MARC¹¹⁾を用いて弾塑性有限変位解析を行う。有限要素として8節点シェル要素 (MARCにおける要素番号22) を用いる。せん断力を受けるアルミニウム長方形板に対して、板幅方向の要素分割数を、1.0~1.9の縦横比に対して10等分割、2.0以上の縦横比に対して8等分割することにより十分な精度の解析値が得られることが示されている¹⁰⁾。したがって、ウェブに対して、各有限要素の形状を正方形とし、隣接する中間垂直補剛材と上下フランジとで囲まれたウェブの縦横比 a/b_w が0.5, 0.75の桁に対して、ウェブの板幅方向を16等分割、 a/b_w が1.0, 1.5, 2.0の桁に対して、ウェブの板幅方向を10等分割する。

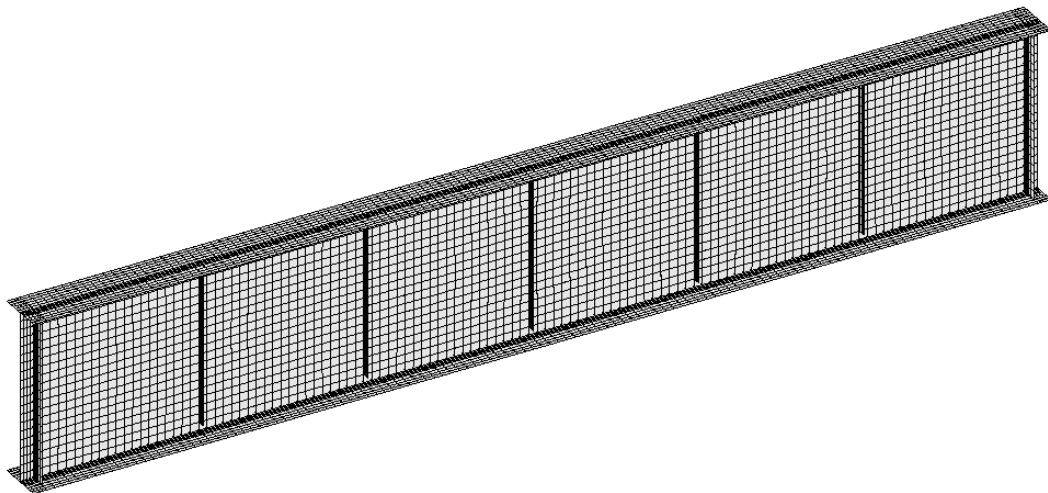
曲げ圧縮を受けるフランジに対して、フランジの全板幅方向を4等分割以上とすれば十分な精度の解析値が得られることが示されている⁴⁾。そこで、フランジと端補剛材および中間垂直補剛材に共有節点を持たせることを考慮して、フランジの全幅方向を8から24の間で等分割する。端補剛材は圧縮力を受けるフランジと同様な部材とみなせるので、片側の端補剛材の板幅方向を4から8の間で等分割する。中間垂直補剛材も板幅方向を4から8の間で等分割する。要素分割を図3.3に示す。端補剛材から外側の桁の張出し長さは $12t_w$ とする。



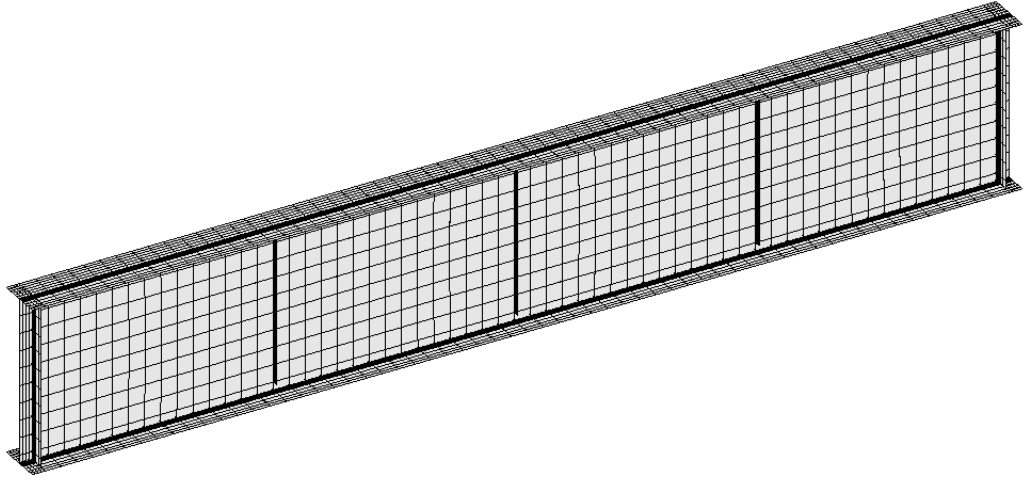
(a) $a/b_w=0.5$



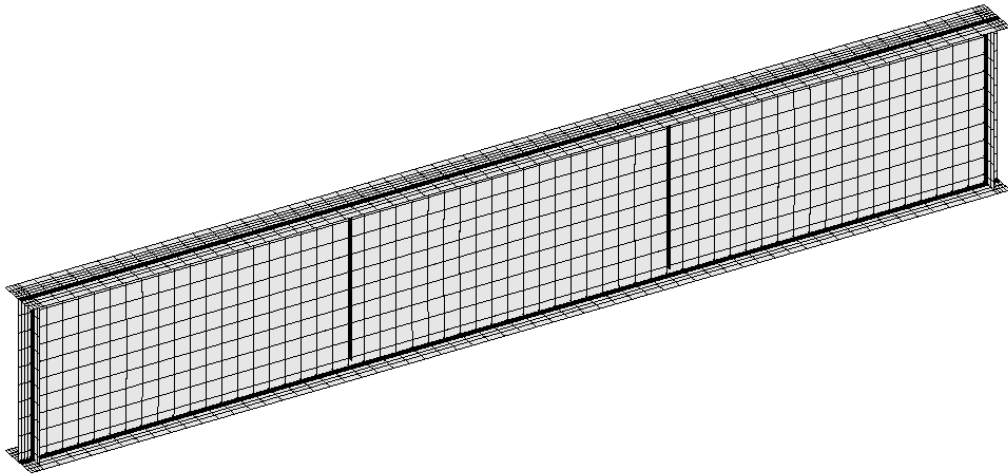
(b) $a/b_w=0.75$



(c) $a/b_w=1.0$



(d) $a/b_w=1.5$



(e) $a/b_w=2.0$

图 3.3 要素分割

第4章 せん断耐荷力

4.1 中間垂直補剛材を持たない桁のせん断耐荷力

中間垂直補剛材を持たないアルミニウム合金 A5083-O 桁のせん断耐荷力は次式で与えられる³⁾.

$$\frac{V_u}{V_Y} = \begin{cases} 1 & (R \leq 0.53) \\ \frac{1.02}{R} - \frac{0.26}{R^2} & (0.53 \leq R \leq 0.92) \\ 0.8 \left(\frac{0.92}{R} \right)^{0.76} & (0.92 \leq R \leq 3) \end{cases} \quad (4.1)$$

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

$$R = \frac{1}{\pi} F \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{5.34 + \frac{4}{\left(\frac{a_L}{b_w}\right)^2}}} \sqrt{\frac{\tau_{0.2} b_w}{E t_w}} = 3.38 \times 10^{-2} \frac{F}{\sqrt{5.34 + \frac{4}{\left(\frac{a_L}{b_w}\right)^2}}} \frac{b_w}{t_w} \quad \left(1.0 \leq \frac{a_L}{b_w}\right) \quad (4.3)$$

$$F = 0.0085 \frac{A_w a_L}{A_f b_w} + 0.75 \leq 1 \quad \left(1.0 \leq \frac{A_w}{A_f} \leq 4.0, 1.0 \leq \frac{a_L}{b_w}\right) \quad (4.4)$$

- 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
 $\tau_{0.2}$: 0.2%せん断耐力 (=72.2MPa)
 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力 (=125MPa)
 R : 0.2%せん断耐力が用いられたウェブ幅厚比パラメータ
 E : ヤング率 (=70GPa)
 μ : ポアソン比 (=0.3)
 a_L : 支点上の端補剛材の間隔 (図 4.1 参照)
 b_w : ウェブの板幅
 t_w : ウェブの板厚
 A_w : ウェブの断面積
 A_f : 上下フランジ 1 枚の断面積

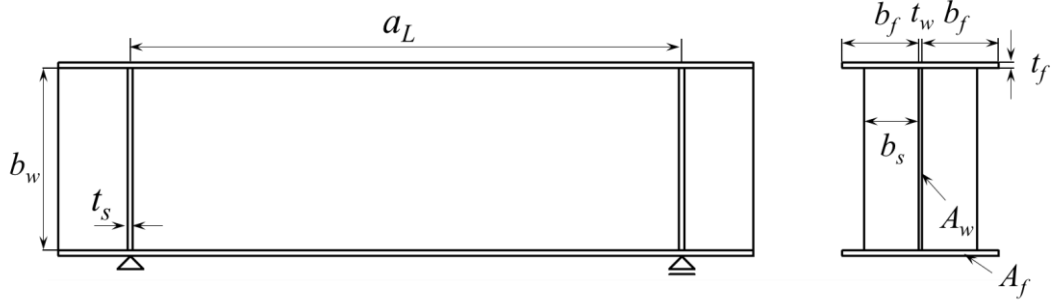


図 4.1 中間垂直補剛材を持たない A5083-O 桁

係数 F は、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、端補剛材とフランジとで囲まれたウェブのせん断座屈強度が四辺固定支持のせん断座屈強度から四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係数である³⁾。

4.2 係数 F

中間垂直補剛材の断面寸法は端補剛材の断面寸法より小さい。したがって、ウェブに対する中間垂直補剛材による回転拘束は端補剛材による回転拘束より小さいので、隣接する中間垂直補剛材間のウェブパネルのせん断座屈強度は、端補剛材のみを有するウェブパネルのせん断座屈強度より小さくなることが予想される。そこで、中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁の V_u/V_Y の解析値を次式に代入して F の値を求める。

$$F = \begin{cases} \text{解なし} & \left(\frac{V_u}{V_Y} \geq 1\right) \\ \frac{15.1 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{V_u}{V_Y}}\right)}{\frac{V_u}{V_Y}} \frac{t_w}{b_w} \sqrt{k} & \left(1 \geq \frac{V_u}{V_Y} \geq 0.8\right) \end{cases} \quad (4.5)$$

$$k = \begin{cases} \frac{20.3}{\left(\frac{V_u}{V_Y}\right)^{1.32}} \frac{t_w}{b_w} \sqrt{k} & \left(0.8 \geq \frac{V_u}{V_Y} \geq 0.326\right) \\ 4 + \frac{5.34}{\left(\frac{a}{b_w}\right)^2} & \left(\frac{a}{b_w} \leq 1\right) \\ 5.34 + \frac{4}{\left(\frac{a}{b_w}\right)^2} & \left(1 < \frac{a}{b_w}\right) \end{cases} \quad (4.6)$$

ここに、 k : 四辺単純支持された長方形板のせん断座屈係数

式(4.5)は、 $a/b_w \leq 1$ の場合も扱うために、式(4.3)の $5.34 + 4/(a_L/b_w)^2$ を、式(4.6)で与えられる四辺単純支持された長方形板のせん断座屈係数で置き換え、式(4.1)を F について解くことにより与えられる。ここで、 a は隣接する中間垂直補剛材の間隔である (図 2.1 参照)。

V_u/V_y の解析値および F の値を付録Aに示す。桁のせん断耐荷力 V_u は有限要素法解析で生じる支点反力の最大値である。終局時の桁ウェブの面外変形を付録Bに示す。

付録Aにおいて、 A_w/A_f と a/b_w の一つの組合せに対して、 $b_w/t_w = 50, 90, 150, 220$ の各値に対する F の値の中で最も大きい値を表4.1に示す。表4.1のデータに対して、 A_w/A_f を媒介変数として F と a/b_w の関係を図4.2に示す。 F は、 $a/b_w = 1$ で最小値をとり、 a/b_w が0.5および2.0に向かうに従って増加する。

表 4.1 係数 F の値

	a/b_w	F
$A_w/A_f = 1$	0.5	0.818
	0.75	0.764
	1.0	0.745
	1.5	0.750
	2.0	0.756
$A_w/A_f = 2$	0.5	0.867
	0.75	0.844
	1.0	0.768
	1.5	0.798
	2.0	0.800
$A_w/A_f = 3$	0.5	0.882
	0.75	0.875
	1.0	0.793
	1.5	0.851
	2.0	0.891
$A_w/A_f = 4$	0.5	0.896
	0.75	0.894
	1.0	0.857
	1.5	0.883
	2.0	0.928

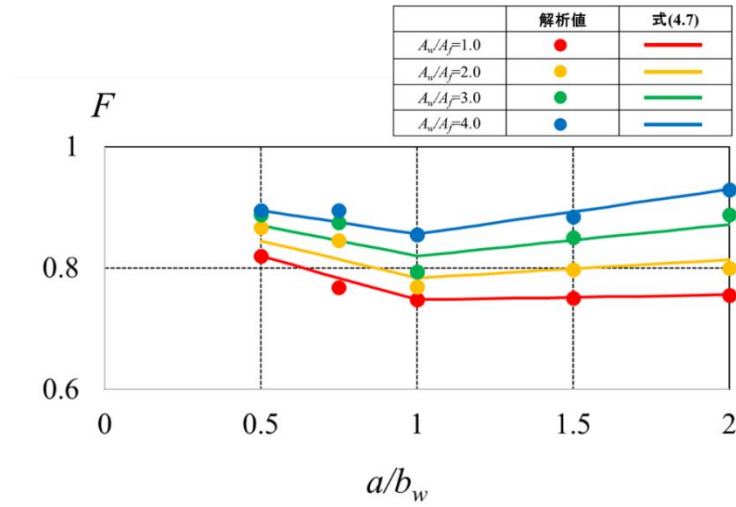


図 4.2 F と a/b_w の関係

図 4.2 の F と a/b_w の関係は次式で近似される.

$$F = \begin{cases} \left(0.022 \frac{A_w}{A_f} - 0.167\right) \frac{a}{b_w} + 0.015 \frac{A_w}{A_f} + 0.875 & \left(0.5 \leq \frac{a}{b_w} \leq 1\right) \\ \left(0.020 \frac{A_w}{A_f} - 0.009\right) \frac{a}{b_w} + 0.017 \frac{A_w}{A_f} + 0.717 & \left(1 < \frac{a}{b_w} \leq 2\right) \end{cases} \quad (4.7)$$

この式は、 $A_w/A_f = 1$ と 4 の各場合に対して、 a/b_w が 0.5 と 1 のプロット点、および a/b_w が 1 と 2 のプロット点をそれぞれ直線で結び、さらに、 $A_w/A_f = 1$ と 4 の間を A_w/A_f の値に関して内分することによって与えられる。式(4.7)が与える F と a/b_w の関係を図 4.2 に示す。

式(4.7)と(4.4)の比較を図 4.3 に示す。 $1.0 < a/b_w \leq 2.0$ において、式(4.7)が与える F が、式(4.4)が与える F より大きい。これは、本節の冒頭で述べたように、隣接する中間垂直補剛材間のウェブパネルのせん断座屈強度は、端補剛材のみを有するウェブパネルのせん断座屈強度より小さくなることに呼応している。

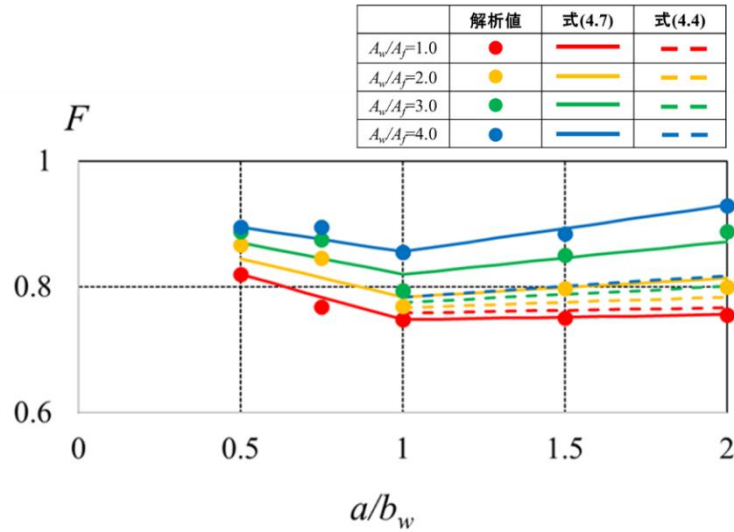


図 4.3 係数 F の比較

4.3 耐荷力曲線と解析値の比較

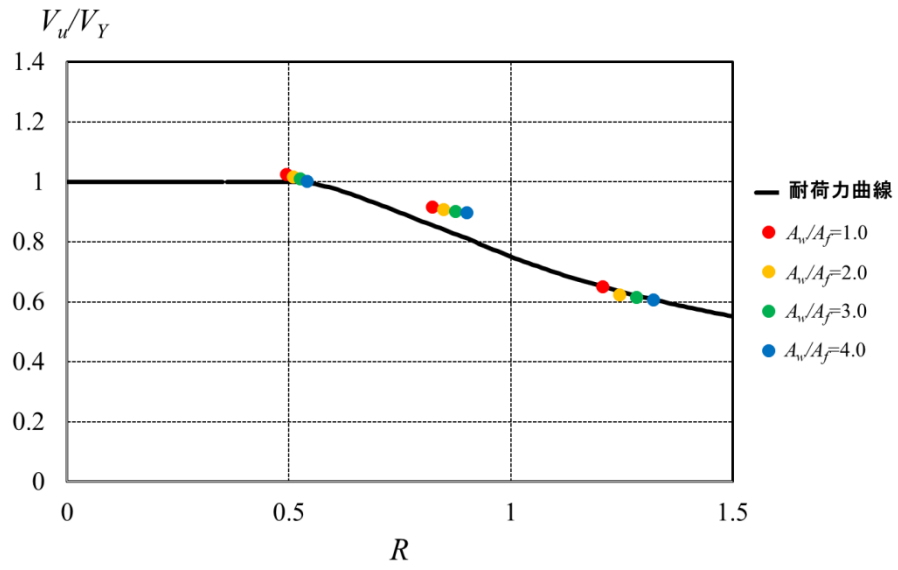
耐荷力曲線と解析値の比較を図 4.4 に示す. さらに, 図 4.4(a)~(e)をまとめて図 4.5 に示す. 耐荷力曲線は式(4.1)で与えられ, 解析値に対する R の値は次式により計算される.

$$R = \frac{1}{\pi} F \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\tau_{0.2}}{E} \frac{b_w}{t_w}} = 3.38 \times 10^{-2} \frac{F b_w}{\sqrt{k} t_w} \quad \left(\frac{b_w}{t_w} \leq 220 \right) \quad (4.8)$$

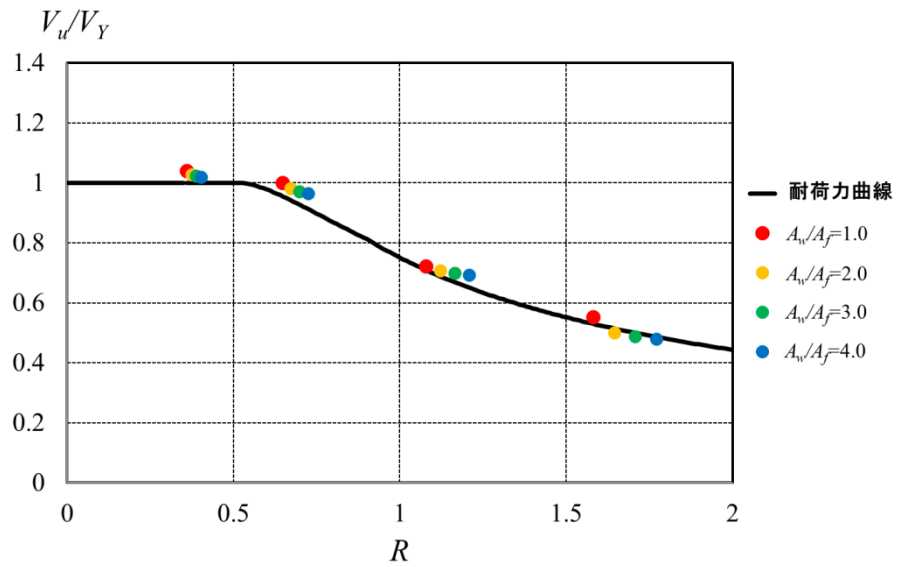
$$k = \begin{cases} 4 + \frac{5.34}{\left(\frac{a}{b_w}\right)^2} & \left(0.5 \leq \frac{a}{b_w} \leq 1 \right) \\ 5.34 + \frac{4}{\left(\frac{a}{b_w}\right)^2} & \left(1 < \frac{a}{b_w} \leq 2 \right) \end{cases} \quad (4.9)$$

$$F = \begin{cases} \left(0.022 \frac{A_w}{A_f} - 0.167 \right) \frac{a}{b_w} + 0.015 \frac{A_w}{A_f} + 0.875 & \left(0.5 \leq \frac{a}{b_w} \leq 1 \right) \\ \left(0.020 \frac{A_w}{A_f} - 0.009 \right) \frac{a}{b_w} + 0.017 \frac{A_w}{A_f} + 0.717 & \left(1 < \frac{a}{b_w} \leq 2 \right) \end{cases} \quad (4.10)$$

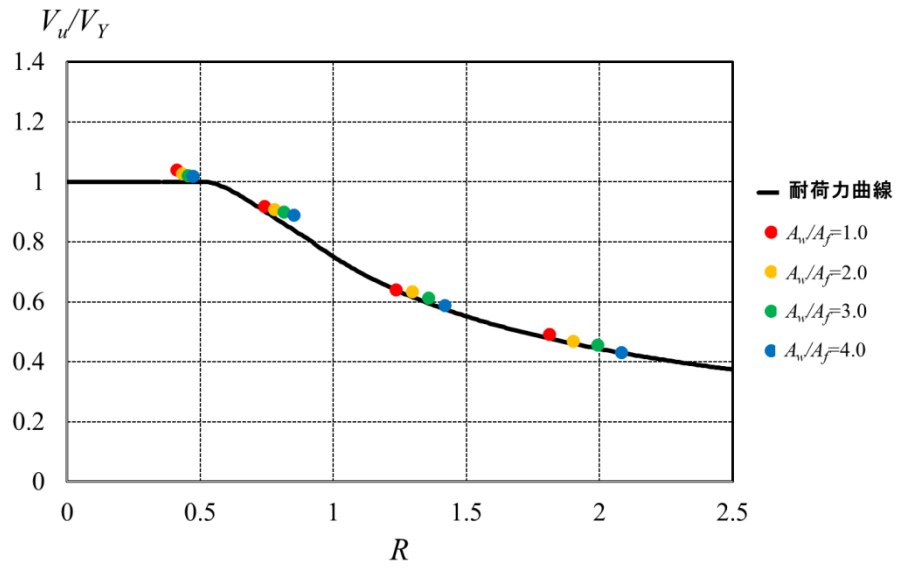
図 4.4 と 4.5 より解析値が耐荷力曲線の近傍に分布していることが分かる. すなわち, 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁のせん断耐荷力は, 式(4.8)~(4.10)で定義された幅厚比パラメータ R が用いられた式(4.1)によって推定することができる.



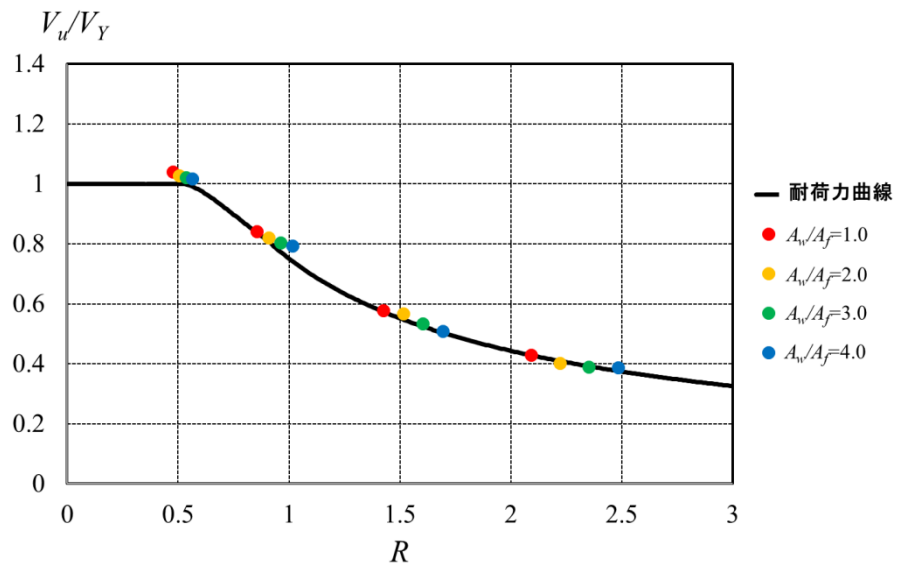
(a) $a/b_w=0.5$



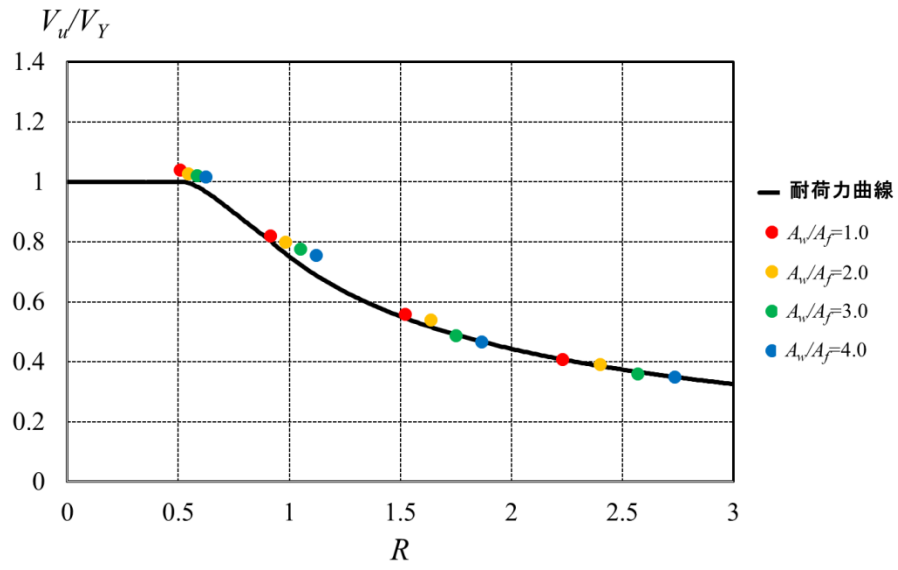
(b) $a/b_w=0.75$



(c) $a/b_w = 1.0$



(d) $a/b_w = 1.5$



(e) $a/b_w=2.0$

図 4.4 V_u/V_Y と R の関係

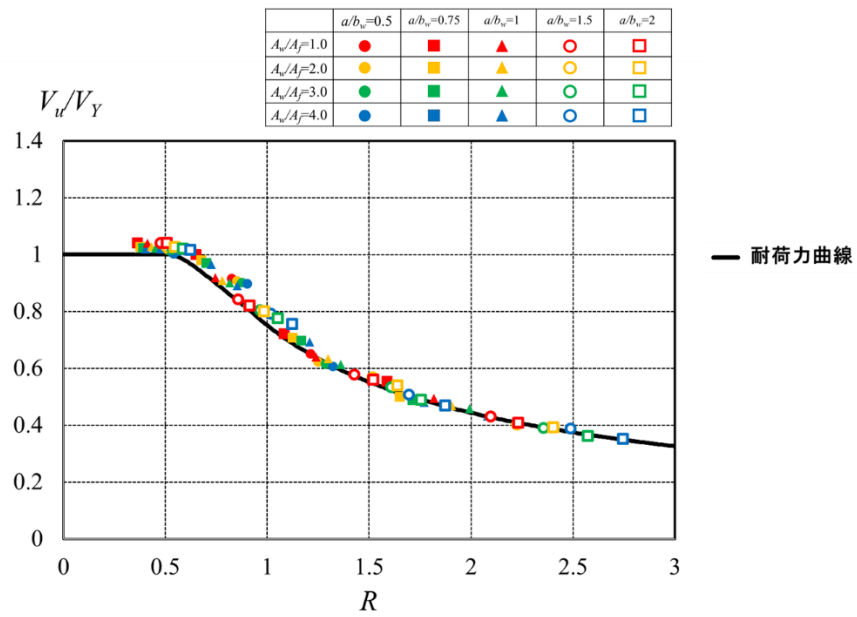


図 4.5 V_u/V_Y と R の関係

第 5 章 結論

本研究では、有限要素法による弾塑性有限変位解析によって、中間垂直補剛材を有するアルミニウム合金 A5083-O 桁のせん断耐荷力を明らかにし、その推定式を次式で与えた。

$$\frac{V_u}{V_Y} = \begin{cases} 1 & (R \leq 0.53) \\ \frac{1.02}{R} - \frac{0.26}{R^2} & (0.53 \leq R \leq 0.92) \\ 0.8 \left(\frac{0.92}{R}\right)^{0.76} & (0.92 \leq R \leq 3) \end{cases}$$

$$V_Y = \tau_{0.2} b_w t_w = \frac{\sigma_{0.2}}{\sqrt{3}} b_w t_w$$

$$R = \frac{1}{\pi} F \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\tau_{0.2}}{E}} \frac{b_w}{t_w} = 3.38 \times 10^{-2} \frac{F}{\sqrt{k}} \frac{b_w}{t_w} \quad \left(\frac{b_w}{t_w} \leq 220\right)$$

$$k = \begin{cases} 4 + \frac{5.34}{\left(\frac{a}{b_w}\right)^2} & \left(0.5 \leq \frac{a}{b_w} \leq 1\right) \\ 5.34 + \frac{4}{\left(\frac{a}{b_w}\right)^2} & \left(1 < \frac{a}{b_w} \leq 2\right) \end{cases}$$

$$F = \begin{cases} \left(0.022 \frac{A_w}{A_f} - 0.167\right) \frac{a}{b_w} + 0.015 \frac{A_w}{A_f} + 0.875 & \left(0.5 \leq \frac{a}{b_w} \leq 1\right) \\ \left(0.020 \frac{A_w}{A_f} - 0.009\right) \frac{a}{b_w} + 0.017 \frac{A_w}{A_f} + 0.717 & \left(1 < \frac{a}{b_w} \leq 2\right) \end{cases}$$

- ここに、 V_u : 桁のせん断耐荷力
 V_Y : ウェブ全体が降伏するときのせん断強度
 $\tau_{0.2}$: 0.2%せん断耐力 (=72.2MPa)
 $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力 (=125MPa)
 R : 0.2%せん断耐力が用いられたウェブ幅厚比パラメータ
 E : ヤング率 (=70GPa)
 μ : ポアソン比 (=0.3)
 F : 係数
 k : 四辺単純支持された長方形板のせん断座屈係数
 a : 隣接する中間垂直補剛材の間隔
 b_w : ウェブの板幅
 t_w : ウェブの板厚

- A_w : ウェブの断面積
 A_f : 上下フランジ 1 枚の断面積

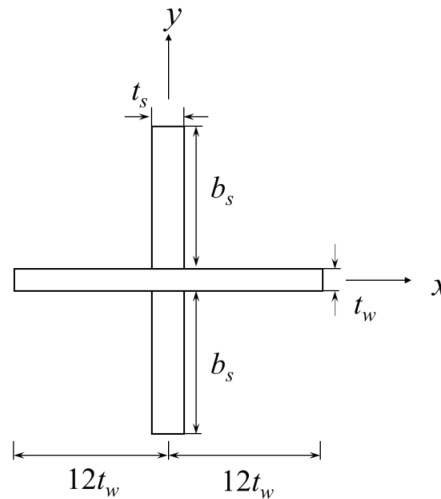
上式は，端補剛材と中間垂直補剛材が次の条件を満たすときに成立する．

端補剛材

- 1) 端補剛材は圧縮力を受ける柱として設計する．
- 2) 端補剛材に作用させる圧縮力として，次式で与えられる，ウェブ全体が降伏するときのせん断強度を用いる．

$$V_Y = \tau_{0.2} b_w t_w = \frac{\sigma_{0.2}}{\sqrt{3}} b_w t_w$$

- 3) 下図に示すように，端補剛材の断面積および端補剛材から両側にそれぞれウェブ厚さの 12 倍の範囲のウェブの断面積を柱としての有効断面積とする．



- 4) 3)の有効断面積は次式を満たさなければならない．

$$24t_w^2 + 2b_s t_s \leq 1.7 \times 2b_s t_s$$

- ここに，
- t_w : ウェブの板厚
 - b_s : 片側の端補剛材の板幅
 - t_s : 端補剛材の板厚

- 5) 柱の有効座屈長はウェブの板幅 b_w の 1/2 とする．
- 6) 片側の端補剛材の幅厚比は次式を満たさなければならない．

$$\frac{b_s}{t_s} \leq 5.87$$

- 7) ウェブの板厚中央回り(上図の x 軸回り)および端補剛材の板厚中央回り(上図の y 軸回り)に対して柱の圧縮耐荷力を算出し，どちらか小さい方の値を端補剛材の圧縮耐荷力とする．

中間垂直補剛材

中間垂直補剛材の断面寸法は次式を満たさなければならない。

$$\frac{t_v b_v^3}{3} \geq \frac{b_w t_w^3}{11} \times 8.0 \left(\frac{b_w}{a} \right)^2$$

$$\frac{b_v}{t_v} \leq 5.87$$

- ここに、 b_v : 中間垂直補剛材の板幅
 t_v : 中間垂直補剛材の板厚
 b_w : ウェブの板幅
 t_w : ウェブの板厚
 a : 隣接する中間垂直補剛材の間隔

参考文献

- 1) 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.
- 2) 鶴見一恵, 大倉一郎: ウェブが縦補剛されたアルミニウム合金 A6061-T6 桁のせん断耐荷力, ALST 研究レポート, No.54, 2019.
- 3) 山中誠矢, 大倉一郎: せん断を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力, ALST 研究レポート, No.49, 2017.
- 4) 鳥畑一博, 大倉一郎: 曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力, ALST 研究レポート, No.42, 2016.
- 5) 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.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, pp.323-328, 2012.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) JIS H 4000: アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条, 2014.
- 10) 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.
- 11) MSC.Software Corporation: Marc Mentat 2013.0.0.

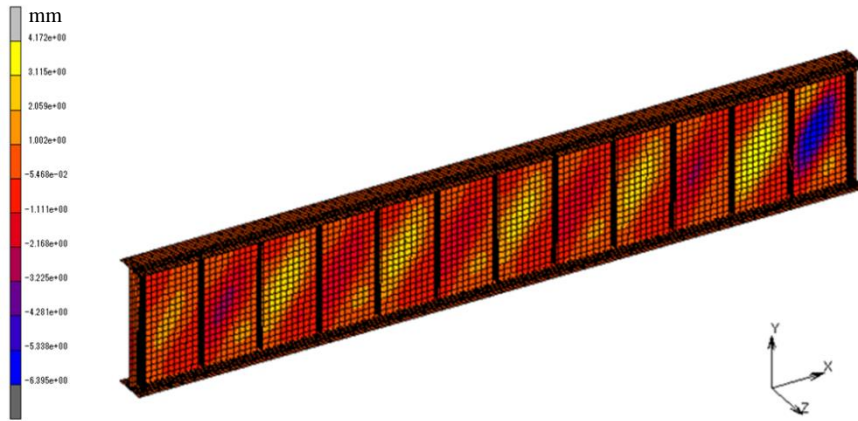
付録A 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁の断面寸法と耐荷力

a/b_w	b_w/t_w	A_w/A_f	b_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	b_s (mm)	t_s (mm)	b_v (mm)	t_v (mm)	V_u/V_Y	F
0.5	50	1	800.0	16.0	189.0	32.5	160.5*	27.3*	113.8	19.4		
		2	800.0	16.0	133.1	22.7	160.5*	27.3*	113.8	19.4		
		3	800.0	16.0	108.0	18.4	160.5*	27.3*	113.8	19.4		
		4	800.0	16.0	93.3	15.8	160.5*	27.3*	113.8	19.4		
	90	1	800.0	8.9	142.1	24.2	89.0*	15.2*	73.1	12.5	1.027	
		2	800.0	8.9	99.9	17.0	89.0*	15.2*	73.1	12.5	1.017	
		3	800.0	8.9	81.1	13.8	89.0*	15.2*	73.1	12.5	1.012	
		4	800.0	8.9	70.0	11.9	89.0*	15.2*	73.1	12.5	1.003	
	150	1	800.0	5.3	110.6	18.8	75.1	12.8	49.9	8.5	0.916	0.713
		2	800.0	5.3	77.8	13.3	75.1	12.8	49.9	8.5	0.908	0.727
		3	800.0	5.3	63.3	10.8	75.1	12.8	49.9	8.5	0.902	0.738
		4	800.0	5.3	54.6	9.3	75.1	12.8	49.9	8.5	0.898	0.745
	220	1	800.0	3.6	91.5	15.6	70.4	12.0	37.5	6.4	0.652	0.818
		2	800.0	3.6	64.4	11.0	70.4	12.0	37.5	6.4	0.624	0.867
		3	800.0	3.6	52.5	8.9	70.4	12.0	37.5	6.4	0.616	0.882
		4	800.0	3.6	45.3	7.7	70.4	12.0	37.5	6.4	0.608	0.896
0.75	50	1	800.0	16.0	189.0	32.5	160.5*	27.3*	92.9	15.8	1.041	
		2	800.0	16.0	133.1	22.7	160.5*	27.3*	92.9	15.8	1.028	
		3	800.0	16.0	108.0	18.4	160.5*	27.3*	92.9	15.8	1.023	
		4	800.0	16.0	93.3	15.8	160.5*	27.3*	92.9	15.8	1.019	
	90	1	800.0	8.9	142.1	24.2	89.0*	15.2*	59.7	10.2	1.001	
		2	800.0	8.9	99.9	17.0	89.0*	15.2*	59.7	10.2	0.981	0.714
		3	800.0	8.9	81.1	13.8	89.0*	15.2*	59.7	10.2	0.971	0.743
		4	800.0	8.9	70.0	11.9	89.0*	15.2*	59.7	10.2	0.964	0.761
	150	1	800.0	5.3	110.6	18.8	75.1	12.8	40.8	6.9	0.722	0.764
		2	800.0	5.3	77.8	13.3	75.1	12.8	40.8	6.9	0.708	0.785
		3	800.0	5.3	63.3	10.8	75.1	12.8	40.8	6.9	0.699	0.797
		4	800.0	5.3	54.6	9.3	75.1	12.8	40.8	6.9	0.693	0.806
	220	1	800.0	3.6	91.5	15.6	70.4	12.0	30.6	5.2	0.554	0.733
2		800.0	3.6	64.4	11.0	70.4	12.0	30.6	5.2	0.501	0.844	
3		800.0	3.6	52.5	8.9	70.4	12.0	30.6	5.2	0.488	0.875	

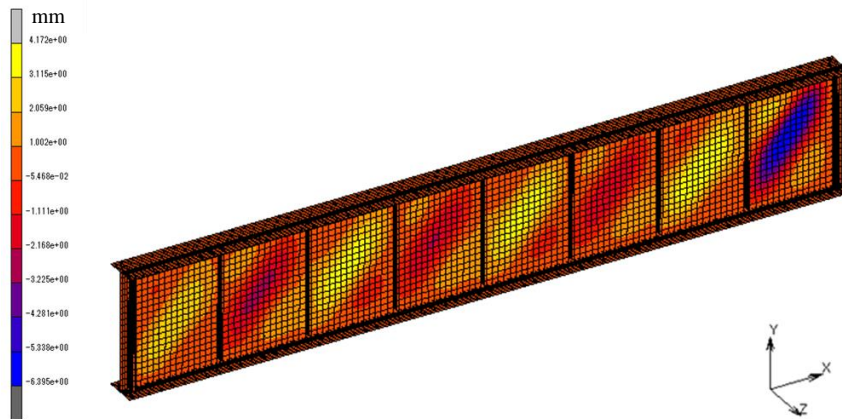
		4	800.0	3.6	45.3	7.7	70.4	12.0	30.6	5.2	0.480	0.894
1.0	50	1	800.0	16.0	189.0	32.5	160.5*	27.3*	80.5	13.7	1.040	
		2	800.0	16.0	133.1	22.7	160.5*	27.3*	80.5	13.7	1.028	
		3	800.0	16.0	108.0	18.4	160.5*	27.3*	80.5	13.7	1.022	
		4	800.0	16.0	93.3	15.8	160.5*	27.3*	80.5	13.7	1.019	
	90	1	800.0	8.9	142.1	24.2	89.0*	15.2*	51.7	8.8	0.919	0.717
		2	800.0	8.9	99.9	17.0	89.0*	15.2*	51.7	8.8	0.908	0.735
		3	800.0	8.9	81.1	13.8	89.0*	15.2*	51.7	8.8	0.900	0.750
		4	800.0	8.9	70.0	11.9	89.0*	15.2*	51.7	8.8	0.889	0.768
	150	1	800.0	5.3	110.6	18.8	75.1	12.8	35.3	6.0	0.640	0.745
		2	800.0	5.3	77.8	13.3	75.1	12.8	35.3	6.0	0.634	0.756
		3	800.0	5.3	63.3	10.8	75.1	12.8	35.3	6.0	0.614	0.787
		4	800.0	5.3	54.6	9.3	75.1	12.8	35.3	6.0	0.588	0.835
	220	1	800.0	3.6	91.5	15.6	70.4	12.0	26.5	4.5	0.493	0.729
		2	800.0	3.6	64.4	11.0	70.4	12.0	26.5	4.5	0.468	0.768
		3	800.0	3.6	52.5	8.9	70.4	12.0	26.5	4.5	0.457	0.793
		4	800.0	3.6	45.3	7.7	70.4	12.0	26.5	4.5	0.431	0.857
1.5	50	1	800.0	16.0	189.0	32.5	160.5*	27.3*	65.7	11.2	1.040	
		2	800.0	16.0	133.1	22.7	160.5*	27.3*	65.7	11.3	1.027	
		3	800.0	16.0	108.0	18.4	160.5*	27.3*	65.7	11.2	1.021	
		4	800.0	16.0	93.3	15.8	160.5*	27.3*	65.7	11.2	1.017	
	90	1	800.0	8.9	142.1	24.2	89.0*	15.2*	42.2	7.2	0.842	0.742
		2	800.0	8.9	99.9	17.0	89.0*	15.2*	42.2	7.2	0.820	0.778
		3	800.0	8.9	81.1	13.8	89.0*	15.2*	42.2	7.2	0.804	0.803
		4	800.0	8.9	70.0	11.9	89.0*	15.2*	42.2	7.2	0.792	0.818
	150	1	800.0	5.3	110.6	18.8	75.1	12.8	28.8	4.9	0.578	0.744
		2	800.0	5.3	77.8	13.3	75.1	12.8	28.8	4.9	0.567	0.763
		3	800.0	5.3	63.3	10.8	75.1	12.8	28.8	4.9	0.534	0.826
		4	800.0	5.3	54.6	9.3	75.1	12.8	28.8	4.9	0.508	0.883
	220	1	800.0	3.6	91.5	15.6	70.4	12.0	21.6	3.7	0.430	0.750
		2	800.0	3.6	64.4	11.0	70.4	12.0	21.6	3.7	0.402	0.798
		3	800.0	3.6	52.5	8.9	70.4	12.0	21.6	3.7	0.391	0.851
		4	800.0	3.6	45.3	7.7	70.4	12.0	21.6	3.7	0.389	0.857

2.0	50	1	800.0	16.0	189.0	32.5	160.5*	27.3*	56.9	9.7	1.040	
		2	800.0	16.0	133.1	22.7	160.5*	27.3*	56.9	9.7	1.027	
		3	800.0	16.0	108.0	18.4	160.5*	27.3*	56.9	9.7	1.021	
		4	800.0	16.0	93.3	15.8	160.5*	27.3*	56.9	9.7	1.017	
	90	1	800.0	8.9	142.1	24.2	89.0*	15.2*	36.6	6.2	0.821	0.732
		2	800.0	8.9	99.9	17.0	89.0*	15.2*	36.6	6.2	0.800	0.764
		3	800.0	8.9	81.1	13.8	89.0*	15.2*	36.6	6.2	0.777	0.793
		4	800.0	8.9	70.0	11.9	89.0*	15.2*	36.6	6.2	0.756	0.821
	150	1	800.0	5.3	110.6	18.8	75.1	12.8	25.0	4.3	0.560	0.733
		2	800.0	5.3	77.8	13.3	75.1	12.8	25.0	4.3	0.540	0.769
		3	800.0	5.3	63.3	10.8	75.1	12.8	25.0	4.3	0.488	0.877
		4	800.0	5.3	54.6	9.3	75.1	12.8	25.0	4.3	0.468	0.928
	220	1	800.0	3.6	91.5	15.6	70.4	12.0	18.7	3.2	0.409	0.756
		2	800.0	3.6	64.4	11.0	70.4	12.0	18.7	3.2	0.392	0.800
		3	800.0	3.6	52.5	8.9	70.4	12.0	18.7	3.2	0.361	0.891
		4	800.0	3.6	45.3	7.7	70.4	12.0	18.7	3.2	0.351	0.926

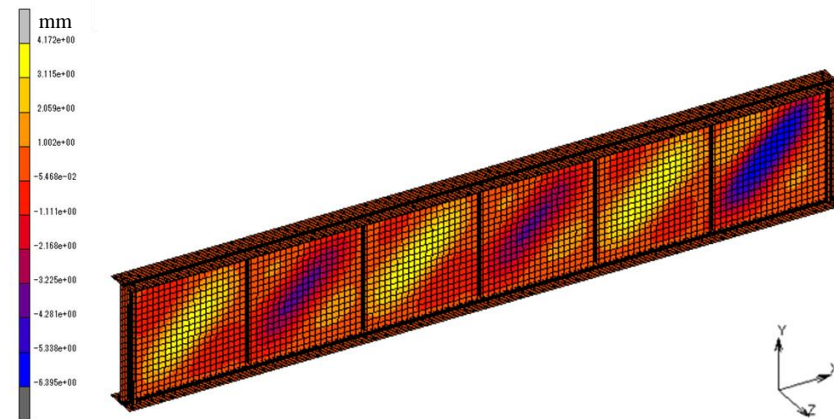
付録B 終局時の桁ウェブの面外変形



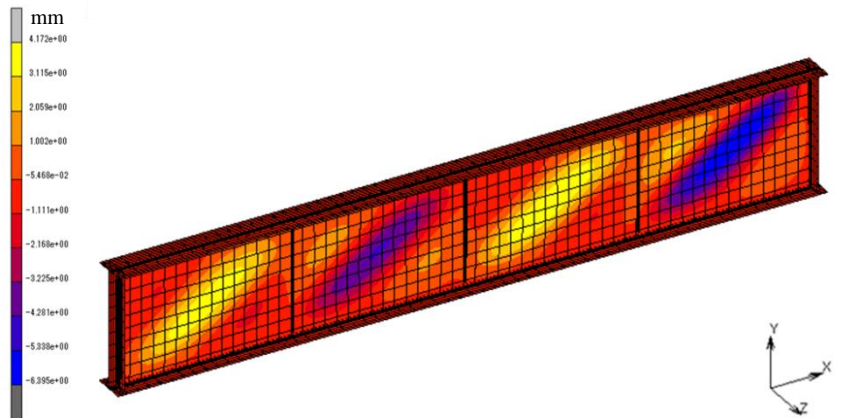
(a) $a/b_w=0.5$ [$b_w/t_w=150$, $A_w/A_f=1.0$]



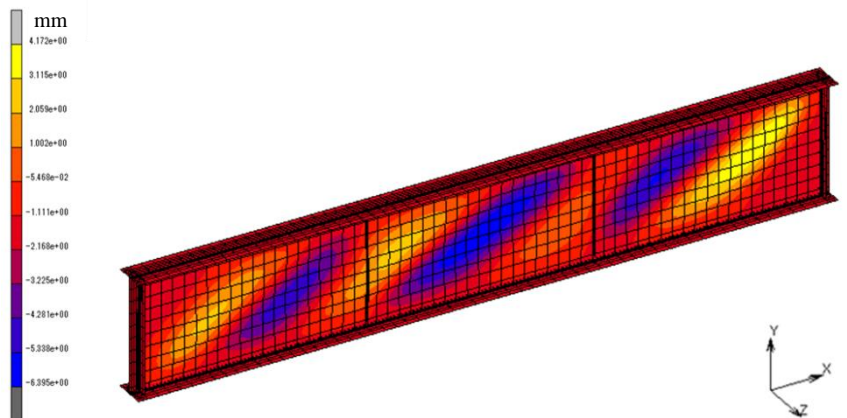
(b) $a/b_w=0.75$ [$b_w/t_w=150$, $A_w/A_f=1.0$]



(c) $a/b_w=1.0$ [$b_w/t_w=150$, $A_w/A_f=1.0$]



(d) $a/b_w=1.5$ [$b_w/t_w=150$, $A_w/A_f=1.0$]



(e) $a/b_w=2.0$ [$b_w/t_w=150$, $A_w/A_f=1.0$]