

曲げとせん断の組合わせ荷重を受ける  
アルミニウム合金桁の耐荷力

ALST 研究レポート 51

2018 年 2 月

大阪大学大学院工学研究科

山木陸呂宇，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、曲げとせん断の組合わせ荷重を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力を明らかにする。A6061-T6の桁に関しては、ウェブに縦補剛された桁の基本を与える研究として、無補剛桁を対象とし、A5083-Oの桁に関しては、無補剛桁および中間垂直補剛材を有する桁を対象とする。

# 目次

第1章 序論	・・・1
第2章 解析モデル	・・・2
2.1 曲げとせん断の組合わせ荷重	・・・2
2.2 桁および支点上補剛材の断面寸法	・・・3
第3章 FEM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	・・・9
3.3 要素分割	・・・10
3.4 初期たわみ	・・・10
3.5 残留応力	・・・12
第4章 解析結果	・・・13
4.1 A6061-T6 桁	・・・13
4.1.1 曲げとせん断の耐荷力相関関係	・・・13
4.1.2 耐荷力とモーメント比の関係	・・・18
4.1.3 ウェブの面外変形	・・・24
4.2 A5083-O 桁	・・・30
4.3 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁	・・・34
4.4 曲げとせん断の耐荷力相関式および耐荷力とモーメント比式	・・・41
第5章 不等曲げ載荷と集中荷重載荷による耐荷力の比較	・・・45
第6章 結論	・・・53
参考文献	・・・55
付録A FEM解析の数値データ[A6061-T6 桁]	・・・56
付録B FEM解析の数値データ[A5083-O 桁]	・・・71
付録C FEM解析の数値データ[中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁]	・・・75
付録D 曲げとせん断の耐荷力相関式	・・・78

## 第1章 序論

アルミニウム歩道橋が2000年頃から建設され、2003年に拡幅歩行者用アルミニウム床版が建設された<sup>1)</sup>。さらに2011年には道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋が建設され<sup>2)</sup>、2015年には津波対策用緊急仮設橋の床版にアルミニウム床版が採用された<sup>3)</sup>。このような状況で、道路橋用アルミニウム床版を支える桁もアルミニウム合金材で製作できるようになることが期待される。

アルミニウム歩道橋の桁を図1.1に示す。その製作方法は鋼桁のそれと同様で、アルミニウム合金A5083-Oの圧延板をMIG溶接による隅肉溶接で連結することにより製作される。道路橋は歩道橋より規模が大きく、設計荷重が格段に大きくなるので、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。道路橋の桁の設計には、0.2%耐力が245MPaのA6061-T6の熱処理アルミニウム合金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%耐力が母材のその約半分まで低下する。したがって、図1.1に示す桁を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、図1.2に示すような、T型断面の押出形材を摩擦攪拌接合によって突合せ接合し、ウェブの水平方向に、等間隔に縦補剛されたウェブを有するアルミニウム合金桁が提案された<sup>4)</sup>。

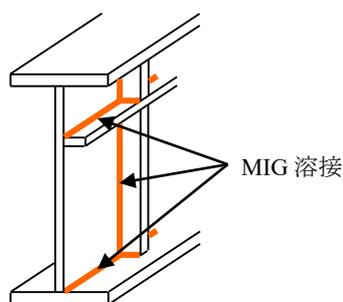


図 1.1 従来のアルミニウム合金桁

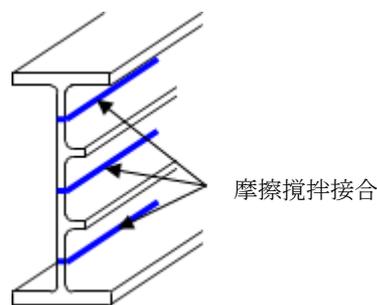


図 1.2 縦補剛されたウェブを有するアルミニウム合金桁

これまで、等曲げを受ける無補剛のアルミニウム合金桁の耐荷力<sup>5),6)</sup>、純せん断を受ける無補剛のアルミニウム合金桁の耐荷力が明らかにされた<sup>7)</sup>。

本研究は、曲げとせん断の組合わせ荷重を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力を明らかにすることを目的とする。A6061-T6の桁に関しては、ウェブに縦補剛された桁の基本を与える研究として、無補剛桁を対象とし、A5083-Oの桁に関しては、無補剛桁および中間垂直補剛材を有する桁を対象とする。

## 第2章 解析モデル

### 2.1 曲げとせん断の組合わせ荷重

図 2.1 に示すように、ウェブの幅と同じ長さの張出しを両端に有する、単純支持された桁の端に、次式で与えられる不等曲げを与えることにより、支点間の桁に曲げとせん断の組合わせ荷重を生じさせる。

$$M_2 = \eta M_1 \quad (2.1)$$

ここに、 $M_1, M_2$  : 桁端モーメント ( $M_1 \geq M_2$ )  
 $\eta$  : モーメント比 ( $-1 \leq \eta \leq 1$ )

不等曲げ载荷に対して、支点間の桁に次式で与えられるせん断力が生じる。

$$V = \frac{M_1 - M_2}{a_L} = \frac{M_1(1 - \eta)}{a_L} \quad (2.2)$$

ここに、 $a_L$  : 桁の支間長

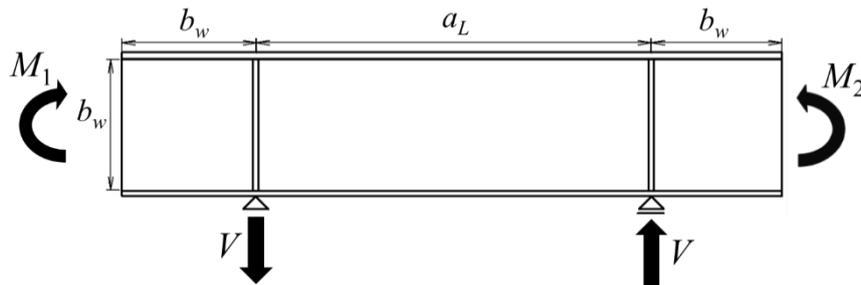


図 2.1 不等曲げ载荷

曲げとせん断の組合わせ荷重に対して、 $M_1$ の最大値  $M_{1u}$ と  $V$ の最大値  $V_u$ が、等曲げ载荷に対する耐荷力  $M_{0u}$ および純せん断载荷に対する耐荷力  $V_{0u}$ で各々無次元化された  $M_{1u}/M_{0u}$ と  $V_u/V_{0u}$ の相関関係を調べることにより、曲げとせん断の組合わせ荷重を受ける桁の耐荷力を調べる。等曲げは、式(2.1)において  $\eta=1$ で与えられる。他方、純せん断载荷は、図 2.2 に示すように、支点間の下フランジを水平方向に拘束し、支点間の上フランジを水平方向に強制変位させることによって与えられる。

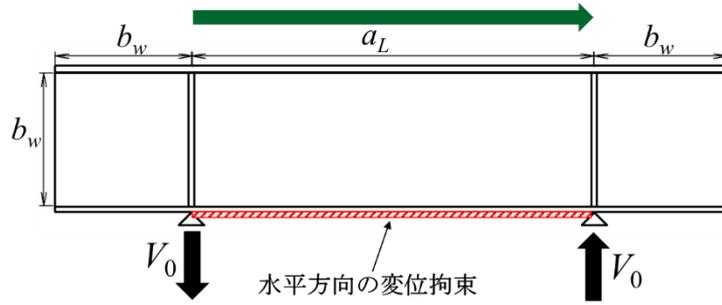


図 2.2 純せん断載荷

## 2.2 桁および支点上補剛材の断面寸法

本研究で扱う桁および支点上補剛材の断面寸法を表 2.1 に示す。桁の断面形状は上下対称である。

表 2.1 桁および支点上補剛材の断面寸法

アルミニウム合金	$b_w/t_w$	$A_w/A_f$	$b_w$ (mm)	$t_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$t_f$ (mm)	$b_s$ (mm)	$t_s$ (mm)	$A_w$ (mm <sup>2</sup> )	$W$ (mm <sup>3</sup> )
A6061-T6	26.7	1	738.0	27.6	240.6	40.1	181.2	30.2	20368.8	17370576
		2	738.0	27.6	168.0	28.0	181.2	30.2	20368.8	9855496
		3	738.0	27.6	136.2	22.7	181.2	30.2	20368.8	7391923
		4	738.0	27.6	117.0	19.5	181.2	30.2	20368.8	6147625
	73.8	1	738.0	10.0	146.4	24.4	111.0	18.5	7380.0	6311473
		2	738.0	10.0	102.6	17.1	111.0	18.5	7380.0	3585176
		3	738.0	10.0	83.4	13.9	111.0	18.5	7380.0	2689264
		4	738.0	10.0	72.0	12.0	111.0	18.5	7380.0	2243439
	150	1	738.0	4.9	103.2	17.2	79.2	13.2	3616.2	3108997
		2	738.0	4.9	72.6	12.1	79.2	13.2	3616.2	1771498
		3	738.0	4.9	58.8	9.8	79.2	13.2	3616.2	1319457
		4	738.0	4.9	51.0	8.5	79.2	13.2	3616.2	1105477
A5083-O	29.7	1	902.0	30.4	254.0	50.8	191.5	38.3	27420.8	28469063
	90.2	1	902.0	10.0	147.5	29.5	112.5	22.5	9020.0	9399364
	188	1	902.0	4.8	103.0	20.6	79.5	15.9	4329.6	4541974

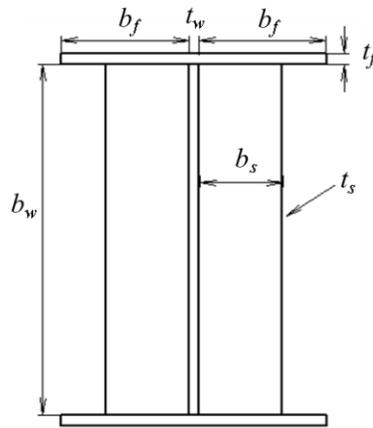


図 2.3 桁断面

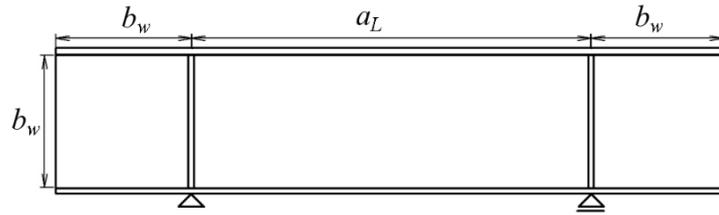
図 2.3 を参照して、表 2.1 の記号の説明を次に示す.

$A_w$	: ウェブの断面積
$A_f$	: 上下フランジ 1 枚の断面積
$b_w$	: 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
$b_s$	: 支点上補剛材の片側の板幅
$t_s$	: 支点上補剛材の板厚
$W$	: 桁断面の弾性断面係数

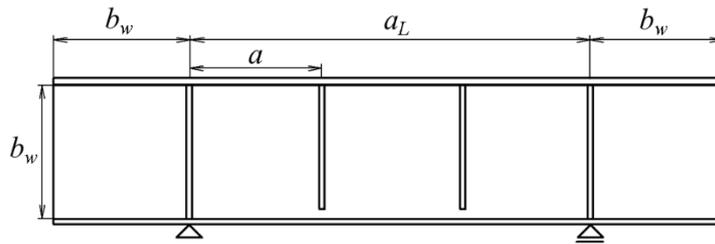
アルミニウム合金 A6061-T6 と A5083-O を考慮する. A6061-T6 の  $b_w/t_w=26.7$  は, 等曲げを受けるアルミニウム合金桁が全塑性モーメントに達するときのウェブの幅厚比,  $b_w/t_w=73.8$  は, 等曲げを受けるアルミニウム合金桁が降伏モーメントに達するときのウェブの幅厚比である<sup>5),6)</sup>. 同様に, A5083-O の  $b_w/t_w=29.7$  は, 等曲げを受けるアルミニウム合金桁が全塑性モーメントに達するときのウェブの幅厚比,  $b_w/t_w=90.2$  は, 等曲げを受けるアルミニウム合金桁が降伏モーメントに達するときのウェブの幅厚比である<sup>5),6)</sup>. A6061-T6 の  $b_w/t_w=150$  と A5083-O の  $b_w/t_w=188$  は, それぞれ A6061-T6 の  $b_w/t_w=73.8$ , A5083-O の  $b_w/t_w=90.2$  の 2 倍を目安とした値である.

ウェブとフランジの断面積比  $A_w/A_f$  について, A6061-T6 に対して 1, 2, 3, 4, A5083-O に対して 1 を考慮する.

ウェブの縦横比について, 無補剛桁に対して, 図 2.4 (a) に示すように,  $a_L/b_w=1, 3, 5$  を考慮し, 中間垂直補剛材を有する桁に対して, 図 2.4 (b) に示すように,  $a/b_w=1$  とし,  $a_L/b_w=3, 5$  を考慮する.  $a_L$  は支点上補剛材の間隔であり,  $a$  は隣接する中間垂直補剛材の間隔である.



(a) 無補剛桁



(b) 中間垂直補剛材を有する桁

図 2.4 ウェブの縦横比

フランジに横倒れ座屈が生じないようにするために、上下フランジの横方向変位を拘束する。さらに、フランジに局部座屈が生じ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、片側のフランジの幅厚比  $\beta_f$  を、次式を満たすように設定する。

$$\beta_f \leq \pi \sqrt{\frac{0.425}{12(1-\mu^2)} \frac{E}{\sigma_{0.2}}} R_{f1} \quad (2.3)$$

ここに、 $\beta_f$  : 片側のフランジの幅厚比

$R_{f1}$  : 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

$E$  : ヤング係数 (=70GPa)

$\mu$  : ポアソン比 (=0.3)

$\sigma_{0.2}$  : 0.2%耐力

アルミニウム合金 A6061-T6 と A5083-O の 0.2%耐力  $\sigma_{0.2}$  は、それぞれ 245MPa, 125MPa であり、A6061-T6 と A5083-O の  $R_{f1}$  は、それぞれ 0.6, 0.4 である<sup>8)</sup>。これらの値に対して、式(2.3)の右辺は、A6061-T6 と A5083-O に対して、それぞれ 6.28, 5.82 になる。したがって、A6061-T6 と A5083-O に対して、 $\beta_f$  をそれぞれ 6, 5 に設定する。

図 2.3 を参照して、フランジの断面積  $A_f$  は次式で与えられる。

$$A_f = t_f(2b_f + t_w) \quad (2.4)$$

$\beta_f$  を用いて、片側のフランジの板幅  $b_f$  が次式で与えられ、

$$b_f = \beta_f t_f \quad (2.5)$$

$A_f$  は次式になる。

$$A_f = t_f(2\beta_f t_f + t_w) \quad (2.6)$$

この式を  $t_f$  について整理して、次式を得る.

$$2\beta_f t_f^2 + t_w t_f - A_f = 0 \quad (2.7)$$

$b_w$  と  $t_w$  の所定の値に対して  $A_w$  の値が決まる.  $A_w/A_f$  の所定の値に対して,  $A_w$  に対応する  $A_f$  の値が決まる. この値と  $t_w$  の値を式(2.7)に代入し,  $t_f$  が求まり, 式(2.5)より  $b_f$  が求まる.

支点上補剛材は, 道路橋示方書<sup>9)</sup>の, 荷重集中点の垂直補剛材の設計に準拠し, 図 2.5 に示すように, 支점에作用するせん断力  $V$  を圧縮力として受ける柱として設計する. 道路橋示方書においては, 柱としての有効断面積に支点上補剛材の両側  $12t_w$  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 としている. しかし, 安全側に立って, 支点上補剛材の両側  $12t_w$  までのウェブの断面積を含めず, 有効座屈長をウェブ高にとる.

上記を考慮して, 支点上補剛材は次式を満足しなければならない.

$$\sigma \leq \sigma_u \quad (2.8)$$

ここに,  $\sigma$  : 支点上補剛材に生じる圧縮応力  
 $\sigma_u$  : 支点上補剛材の圧縮耐荷力

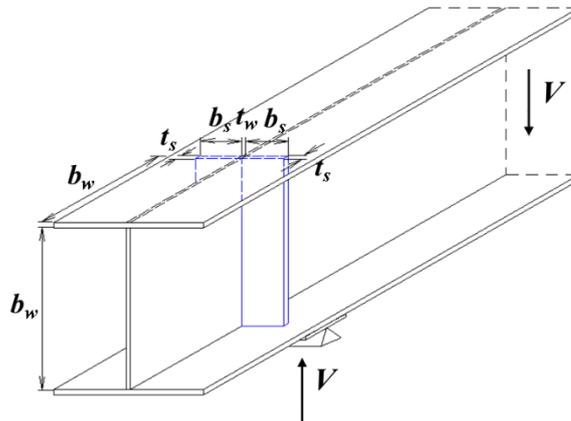


図 2.5 支点上補剛材

支점에作用するせん断力  $V$  に対して, ウェブ断面全体が降伏する場合に対するせん断力  $V_Y$  を採用すると,  $\sigma$  は次式で与えられる.

$$\sigma = \frac{V_Y}{A_s} = \frac{\tau_{0.2} b_w t_w}{t_s (2b_s + t_w)} = \frac{\sigma_{0.2} b_w t_w}{\sqrt{3} t_s (2b_s + t_w)} = \frac{\sigma_{0.2} b_w t_w}{\sqrt{3} t_s (2\beta_{f1} t_s + t_w)} \quad (2.9)$$

ここに,  $V_Y$  : ウェブ全体が降伏する場合のせん断力  
 $A_s$  : 両側の支点上補剛材の断面積  
 $\tau_{0.2}$  : 0.2%せん断耐力 ( $= \sigma_{0.2}/\sqrt{3}$ )

支点上補剛材に局部座屈が生じないようにするために, 片側の支点上補剛材の幅厚比  $b_s/t_s$  を  $\beta_f$  に設定する.

支点上補剛材の圧縮耐荷力は次式で与えられる<sup>10)</sup>.

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} = \begin{cases} 1 & (\lambda \leq \lambda_1) \\ a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2 + a_3\lambda^3 + a_4\lambda^4 & (\lambda_1 \leq \lambda \leq 2) \end{cases} \quad (2.10)$$

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

ここに、 $\lambda$  : 支点上補剛材の細長比パラメータ

$\lambda_1, a_0 \sim a_4$  : 定数

$\lambda_1$  と  $\sigma_{0.2}, a_0 \sim a_4$  の値を表 2.2 に示す。

表 2.2  $\lambda_1$  と  $a_0 \sim a_4$  の値

アルミニウム合金	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\lambda_1$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
A6061-T6	245	0.13	1.01	-0.03	-0.30	-0.04	0.05
A5083-O	125	0.09	1.00	0.10	-1.13	0.72	-0.14

式(2.9)は  $t_s$  の関数であり、式(2.11)の  $\lambda$  は  $t_s$  を変数として持つので、 $\sigma_u$  も  $t_s$  の関数になる。したがって、式(2.8)は  $t_s$  に関して非線形になるので、同式で等号が成立する場合に対して数値計算を行い、支点上補剛材の寸法を決定する。

### 第 3 章 FEM による弾塑性有限変位解析

#### 3.1 応力-ひずみ関係

汎用有限要素解析プログラム MARC<sup>11)</sup>を用いて、曲げとせん断の組合わせ荷重を受けるアルミニウム合金桁の弾塑性有限変位解析を行う。アルミニウム合金の応力-ひずみ関係は次式で与えられる<sup>12)</sup>。

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

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

$n$  : ひずみ硬化パラメータ

アルミニウム合金 A6061-T6 と A5083-O の 0.2%耐力  $\sigma_{0.2}$  とひずみ硬化パラメータ  $n$  の値を表 3.1 に示す。 $\sigma_{0.2}$  に対して、日本工業規格で規定される 0.2%耐力<sup>13),14)</sup>を用いる。ひずみ硬化パラメータ  $n$  の値は、引張試験の結果に基づいて、非超過確率 5%に対する値である<sup>12)</sup>。

表 3.1 0.2%耐力とひずみ硬化パラメータの値

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

### 3.2 境界条件

要素分割を図 3.1 に示す。不等曲げ载荷に対する境界条件を表 3.2 に示す。  $u$ ,  $v$ ,  $w$  は、それぞれ  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸方向の変位を表し、  $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$  は、それぞれ  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸回りの回転角を表す。フランジに横倒れ座屈が生じないようにするために、辺 BE と HK の  $z$  軸方向変位を拘束する。左端の midpoint M を中心として、ウェブの辺 BH とフランジの辺 AC と GI を  $z$  軸回りに強制回転させることによって桁に曲げモーメントを与える。右端の midpoint N に対してもこれと同様にする。 midpoint M と N の  $x$  軸方向の変位は拘束しない。これを実現させるために、辺 BH, AC, GI, EK, DF, JL に剛棒を取り付け、ウェブとフランジの板要素の節点と剛棒の節点とを共有させる。有限要素として、板に対して 8 節点シェル要素 (MARC における要素番号 22)、剛棒に対して 3 次元弾性梁要素 (MARC における要素番号 52) を使用する。3 次元弾性梁要素の伸び剛性とねじり剛性をゼロ、曲げ剛性に大きな値を設定することにより、剛棒を実現する。さらに、左端の midpoint M と辺 BH 上の各節点をタイイングし、各節点の  $z$  軸回りの回転角が同じになるようにする。点 B と辺 AC 上の各節点をタイイングし、  $x$  軸方向と  $y$  軸方向の各変位が同じになるようにする。さらに点 H と辺 GI 上の各節点もタイイングし、  $x$  軸方向と  $y$  軸方向の各変位が同じになるようにする。右端の midpoint N と辺 EK および点 E と辺 DF、点 K と辺 JL に対しても前述と同様にする。

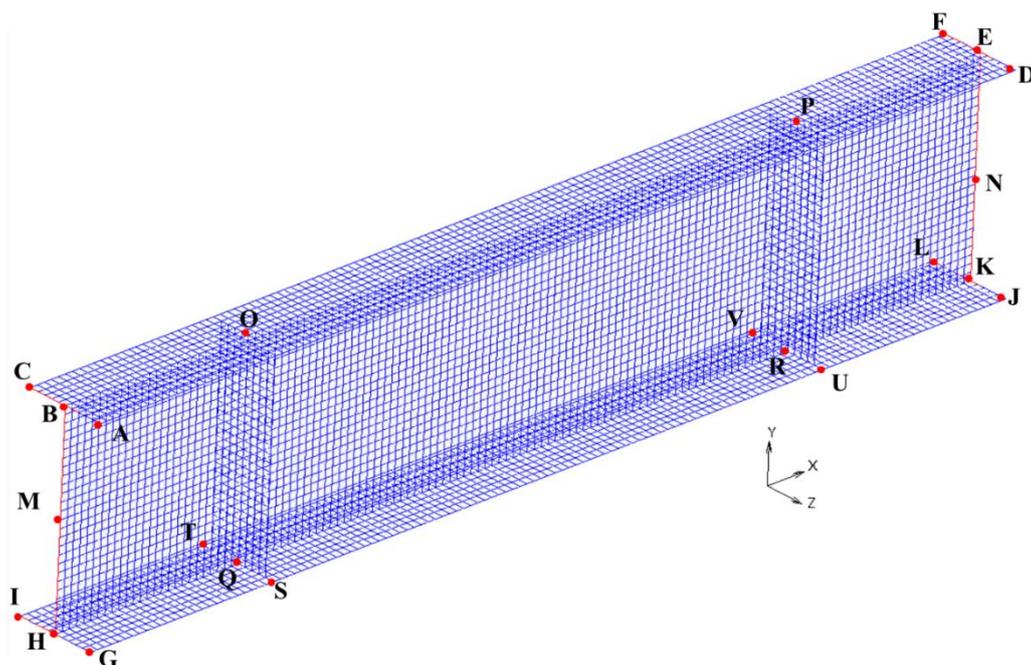


図 3.1 要素分割

表 3.2 不等曲げ載荷に対する境界条件

	$u$	$v$	$w$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
点 M	—	—	—	—	—	強制回転
点 N	—	—	—	—	—	強制回転
辺 BE と HK	—	—	拘束	—	—	—
辺 ST	拘束	拘束	拘束	—	—	—
辺 UV	—	拘束	拘束	—	—	—

純せん断載荷に対する境界条件を表 3.3 に示す。図 3.1 において、点 O と P は上フランジと支点上補剛材が交差する辺上の点である。点 Q と R は下フランジと支点上補剛材が交差する辺上の点である。辺 QR の  $x$  軸方向の変位を拘束し、辺 OP に強制変位  $d_u$  を  $x$  軸方向に与える。

表 3.3 純せん断載荷に対する境界条件

	$u$	$v$	$w$
辺 OP	強制変位	—	—
辺 QR	拘束	—	—
辺 BE と HK	—	—	拘束
辺 ST と UV	拘束	拘束	拘束

### 3.3 要素分割

ウェブの高さ方向の要素分割に対して、等曲げを受ける場合 16 分割、純せん断を受ける場合 10 分割で十分な精度が得られることが示されているので<sup>5),6),7)</sup>、ウェブの高さ方向の要素分割を 16 分割以上とする。ウェブの長さ方向の要素分割に関しては、一要素の  $x$  軸方向の長さに対する  $y$  軸方向の長さが 0.9 から 1.1 の範囲になるようにする。自由突出板の耐荷力は、板幅方向を 4 分割することにより十分な精度が得られることが示されているので<sup>8)</sup>、片側のフランジおよび片側の支点上補剛材の板幅方向を 4 分割以上の要素分割とする。要素分割の一例を図 3.1 に示す。

### 3.4 初期たわみ

無補剛桁に関しては、図 3.2(a) を参照して、支点間のウェブに対して、次式で与えられるサイン半波形の初期たわみを仮定する。

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

ここに、 $m$  : ウェブの長さ方向の初期たわみモード数

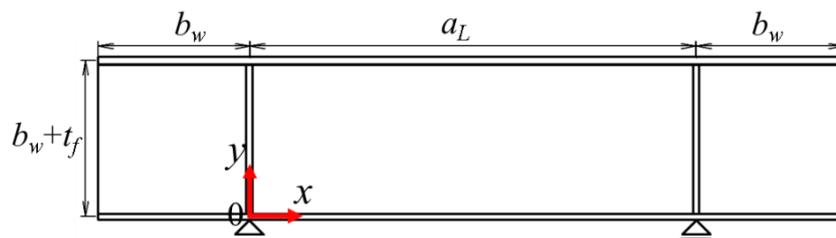
式(3.2)の最大初期たわみ  $b_w/250$  は、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針（案）<sup>10</sup> で規定される桁ウェブの製作精度である。

等曲げを受ける場合、面内曲げを受ける長方形板の耐荷力<sup>15</sup>が最も低くなる  $a_L/(0.5b_w)$ 、純せん断を受ける場合、面内せん断を受ける長方形板の座屈モード数<sup>16</sup>を初期たわみモード数  $m$  に採用する。不等曲げを受ける場合、等曲げ載荷の  $m$  をウェブに仮定して得られる耐荷力と純せん断載荷の  $m$  をウェブに仮定して得られる耐荷力のうち、低い方の耐荷力をこの場合の耐荷力として採用する。両側の張出しは等曲げを受けるので、張出しに対しては、 $m=a_L/(0.5b_w)$ の初期たわみをウェブに仮定する。

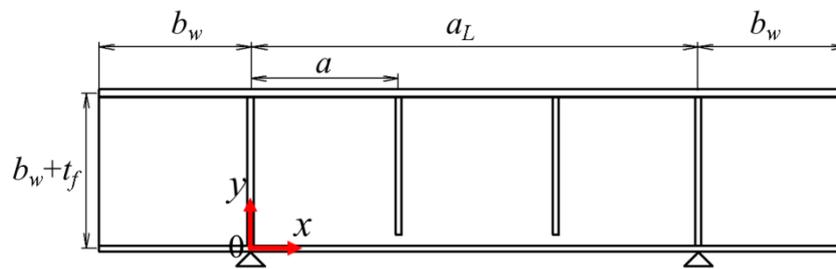
中間垂直補剛材を有する桁に関しては、図 3.2 (b)を参照して、隣接する中間垂直補剛材間の一つのウェブパネルに対して、次式で与えられる初期たわみを仮定する。

$$w_0 = \frac{b_w}{250} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_w+t_f}\right) \quad (3.3)$$

$a/b_w=1$  であるので、等曲げ載荷に対して  $m=2$ 、純せん断載荷に対して  $m=1$  の初期たわみをウェブに仮定する。算出された、低い方の耐荷力を不等曲げ載荷に対する耐荷力として採用する。両側の張出しに対しては、 $m=a_L/(0.5b_w)$ の初期たわみをウェブに仮定する。



(a) 無補剛桁



(b) 中間垂直補剛材を有する桁

図 3.2 初期たわみ

### 3.5 残留応力

A6061-T6 の押出型材の連結に用いられる摩擦攪拌接合は MIG 溶接に比べて入熱量が少ないので、摩擦攪拌接合部の強度低下とその範囲は MIG 溶接のそれらより小さいが、摩擦攪拌接合においても接合部は強度低下を起こす<sup>12)</sup>。これに対して、**図 3.3** に示すように、接合中心から各側 25mm、すなわち 50mm の範囲の板厚を、次式で与えられる板厚にとることにより、0.2%耐力に関して、接合部の断面強度を母材のそれと同じにすることができる<sup>10)</sup>。

$$t_j = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{j0.2}} t \quad (3.4)$$

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

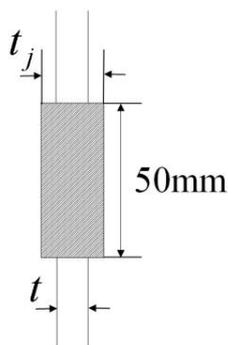


図 3.3 部分的に増厚された板

式(3.4)によって増厚された接合部を有する長方形板の曲げ耐荷力およびせん断耐荷力は、非接合の長方形板のそれより高くなることが示されている<sup>6),16)</sup>。したがって、A6061-T6 の桁に対しては、摩擦攪拌接合による残留応力を考慮せず、非接合桁のみを扱う。

A5083-O の桁に関しては、**図 1.1** に示すように、フランジとウェブの連結に MIG 溶接が用いられるが、溶接部は強度低下を起こさない。フランジに生じる溶接残留応力はフランジの横倒れ耐荷力に影響する<sup>6)</sup>。しかし、本研究では、上下フランジの横方向変位が拘束されているので、フランジに生じる溶接残留応力の影響はない。さらに、長方形板の曲げ耐荷力およびせん断耐荷力に溶接残留応力はほとんど影響しない<sup>6),16)</sup>。したがって、A5083-O の桁においても非接合桁のみを扱う。

## 第4章 解析結果

### 4.1 A6061-T6 桁

#### 4.1.1 曲げとせん断の耐荷力相関関係

曲げとせん断の組合わせ荷重に対する耐荷力相関関係を図 4.1~4.3 に示す。これらの図は  $b_w/t_w$  の値が異なる。さらに、各図の図 (a), (b), (c) は  $a_L/b_w$  の値が異なる。解析値の数値データを付録 A に示す。図の縦軸は、 $V_u$  が  $V_{0u}$  によって無次元化され、横軸は、 $M_{1u}$  が  $M_{0u}$  によって無次元化されている。 $M_{1u}$  と  $M_{0u}$  の値は、FEM 解析において強制回転を与えた節点に生じる反力モーメントの最大値である。 $V_u$  は、 $M_{1u}$  を式(2.2)の  $M_1$  に用いて得られる値である。 $V_{0u}$  は、FEM 解析で生じる支点反力の最大値である。 $M_{0u}/M_Y$  と  $V_{0u}/V_Y$  の値を表 4.1 に示す。桁の降伏モーメント  $M_Y$  とウェブ全体が降伏する場合のせん断力  $V_Y$  は、それぞれ次式で与えられる。

$$M_Y = \sigma_{0.2} W = \sigma_{0.2} \frac{\frac{t_w b_w^3}{12} + 2 \left\{ \frac{B_f t_f^3}{12} + t_f B_f \left( \frac{b_w + t_f}{2} \right)^2 \right\}}{\frac{b_w + 2t_f}{2}} \quad (4.1)$$

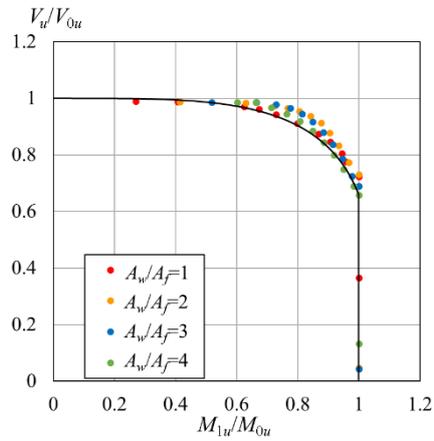
$$V_Y = \tau_{0.2} A_w = \tau_{0.2} b_w t_w = \frac{\sigma_{0.2}}{\sqrt{3}} b_w t_w \quad (4.2)$$

弾性断面係数  $W$  とウェブの断面積  $A_w$  の値は表 2.1 に示してある。

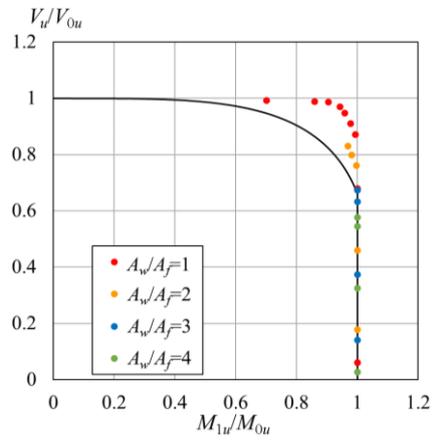
各図に記載される曲げとせん断力の耐荷力相関曲線は 4.4 節の式(4.5)で与えられ、これに対する考察は 4.4 節で与える。

曲げとせん断の組合わせ荷重に対する耐荷力相関関係に関して、図より次の傾向が確認できる。

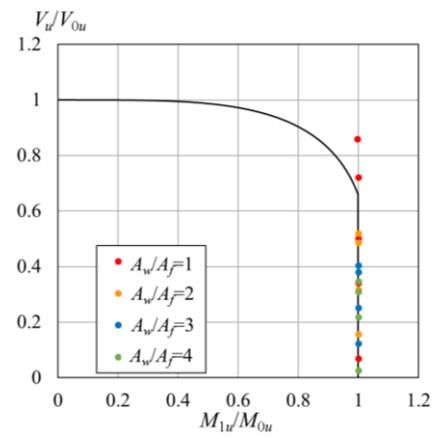
- (1)  $V_u/V_{0u}$  が 1 から低下すると、 $M_{1u}/M_{0u}$  が増加し、 $V_u/V_{0u}$  のある値以下で  $M_{1u}/M_{0u}=1$  になる。
- (2)  $a_L/b_w$  が大きくなるに従って、 $M_{1u}/M_{0u}=1$  になるプロット点数が多くなる。
- (3)  $A_w/A_f$  が大きくなるに従って、 $M_{1u}/M_{0u}=1$  になるプロット点数が多くなる。



(a)  $a_L/b_w=1$

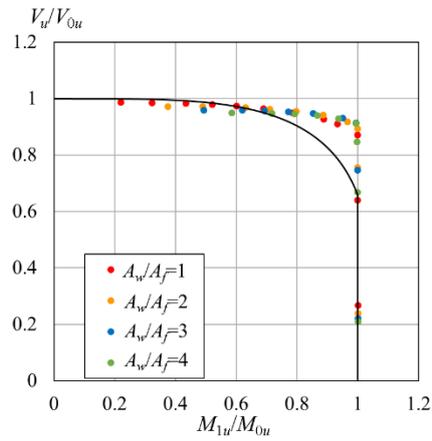


(b)  $a_L/b_w=3$

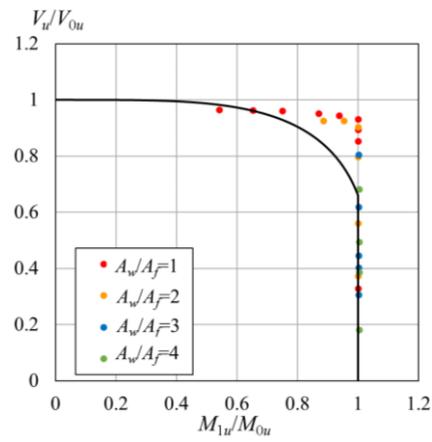


(c)  $a_L/b_w=5$

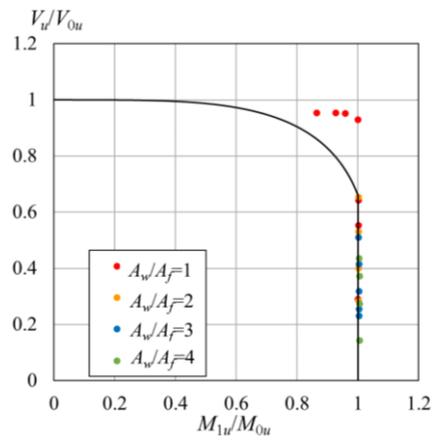
図 4.1  $M_{1u}/M_{0u} - V_u/V_{0u}$  関係 [ $b_w/t_w=26.7$ ]



(a)  $a_L/b_w=1$

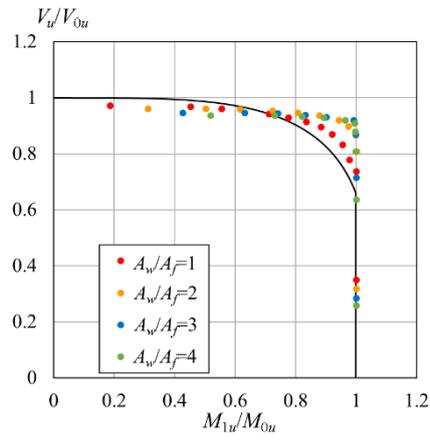


(b)  $a_L/b_w=3$

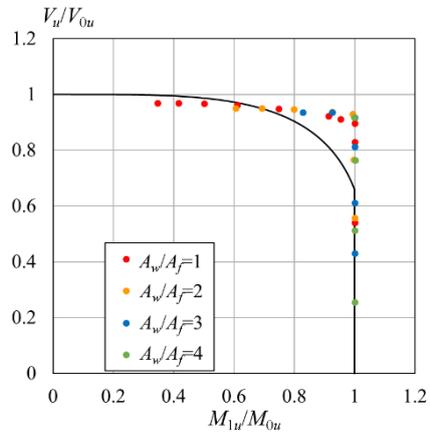


(c)  $a_L/b_w=5$

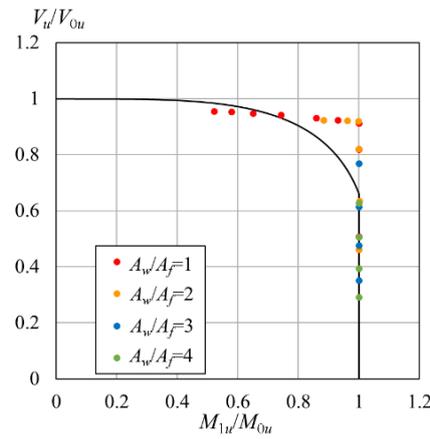
図 4.2  $M_{1u}/M_{0u} - V_u/V_{0u}$  関係 [ $b_w/t_w=73.8$ ]



(a)  $a_L/b_w=1$



(b)  $a_L/b_w=3$



(c)  $a_L/b_w=5$

図 4.3  $M_{1u}/M_{0u} - V_u/V_{0u}$  関係 [ $b_w/t_w=150$ ]

表 4.1  $M_{0u}/M_Y$  と  $V_{0u}/V_Y$  の値

			$a_L/b_w=1$	$a_L/b_w=3$	$a_L/b_w=5$
$b_w/t_w=26.7$	$A_w/A_f=1$	$M_{0u}/M_Y$	1.145	1.145	1.145
		$V_{0u}/V_Y$	1.165	1.066	1.057
		$M_Y$ (N・mm)	4255791120		
	$A_w/A_f=2$	$M_{0u}/M_Y$	1.190	1.189	1.189
		$V_{0u}/V_Y$	1.076	1.040	1.039
		$M_Y$ (N・mm)	2414596520		
	$A_w/A_f=3$	$M_{0u}/M_Y$	1.227	1.226	1.226
		$V_{0u}/V_Y$	1.050	1.032	1.031
		$M_Y$ (N・mm)	1811021135		
	$A_w/A_f=4$	$M_{0u}/M_Y$	1.257	1.257	1.257
		$V_{0u}/V_Y$	1.039	1.027	1.027
		$M_Y$ (N・mm)	1506168125		
$V_Y$ (N)		2881183			
$b_w/t_w=73.8$	$A_w/A_f=1$	$M_{0u}/M_Y$	1.062	1.061	1.061
		$V_{0u}/V_Y$	0.939	0.794	0.771
		$M_Y$ (N・mm)	1546310885		
	$A_w/A_f=2$	$M_{0u}/M_Y$	1.058	1.057	1.057
		$V_{0u}/V_Y$	0.923	0.766	0.737
		$M_Y$ (N・mm)	878368120		
	$A_w/A_f=3$	$M_{0u}/M_Y$	1.048	1.045	1.046
		$V_{0u}/V_Y$	0.914	0.742	0.702
		$M_Y$ (N・mm)	658869680		
	$A_w/A_f=4$	$M_{0u}/M_Y$	1.039	1.035	1.035
		$V_{0u}/V_Y$	0.907	0.724	0.680
		$M_Y$ (N・mm)	549642555		
$V_Y$ (N)		1043907			
$b_w/t_w=150$	$A_w/A_f=1$	$M_{0u}/M_Y$	0.973	0.973	0.973
		$V_{0u}/V_Y$	0.726	0.466	0.428
		$M_Y$ (N・mm)	761704265		
	$A_w/A_f=2$	$M_{0u}/M_Y$	0.923	0.923	0.923
		$V_{0u}/V_Y$	0.675	0.449	0.405
		$M_Y$ (N・mm)	434017010		

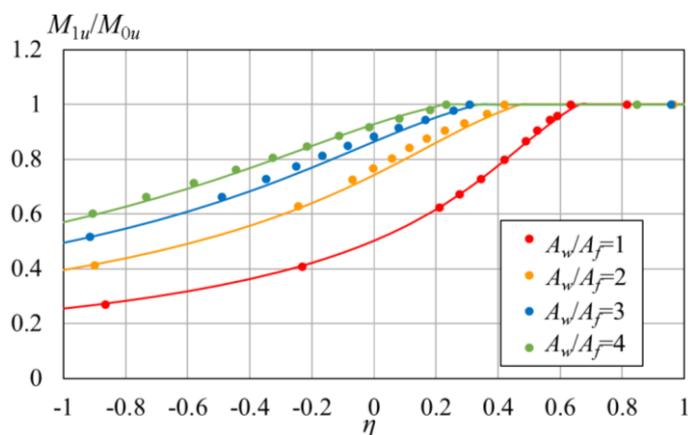
$A_w/A_f=3$	$M_{0u}/M_Y$	0.876	0.876	0.876
	$V_{0u}/V_Y$	0.659	0.441	0.390
	$M_Y$ (N・mm)	323266965		
$A_w/A_f=4$	$M_{0u}/M_Y$	0.838	0.837	0.838
	$V_{0u}/V_Y$	0.649	0.435	0.382
	$M_Y$ (N・mm)	270841865		
$V_Y$ (N)		511514		

#### 4.1.2 耐荷力とモーメント比の関係

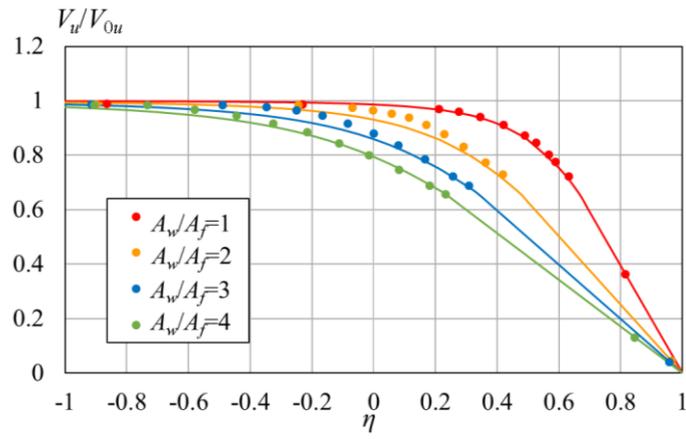
$M_{1u}/M_{0u}$  と  $\eta$  の関係および  $V_u/V_{0u}$  と  $\eta$  の関係を図 4.4~4.6 に示す。これらの図は、前項で示した図と同様に、 $b_w/t_w$  と  $a_L/b_w$  の値が異なる。 $M_{1u}/M_{0u}-\eta$  曲線および  $V_u/V_{0u}-\eta$  曲線は、4.4 節の式(4.6)で与えられ、これらに対する考察は 4.4 節で与える。

耐荷力とモーメント比の関係に関して、図より次の傾向が確認できる。

- (1)  $\eta$  が -1 から大きくなるに従って、 $M_{1u}/M_{0u}$  は増加し、 $V_u/V_{0u}$  は減少する。 $\eta$  のある値以上で  $M_{1u}/M_{0u}=1$  になる。
- (2)  $a_L/b_w$  が大きくなるに従って、 $M_{1u}/M_{0u}=1$  になる  $\eta$  の値は小さくなり、 $V_u/V_{0u}$  は低下する。
- (3)  $A_w/A_f$  が大きくなるに従って、 $M_{1u}/M_{0u}=1$  になる  $\eta$  の値は小さくなり、 $V_u/V_{0u}$  は低下する。

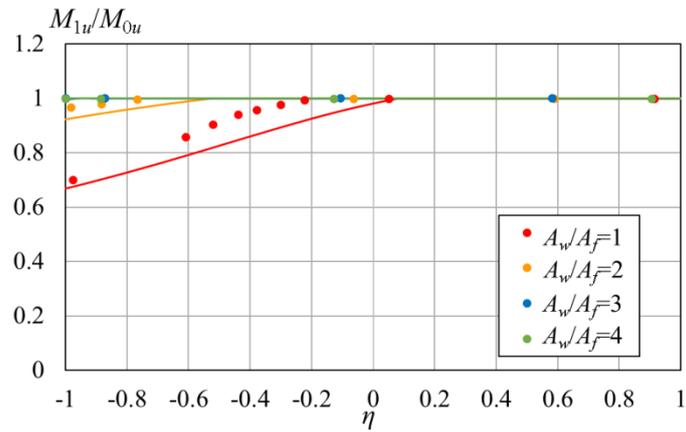


$M_{1u}/M_{0u}-\eta$  関係

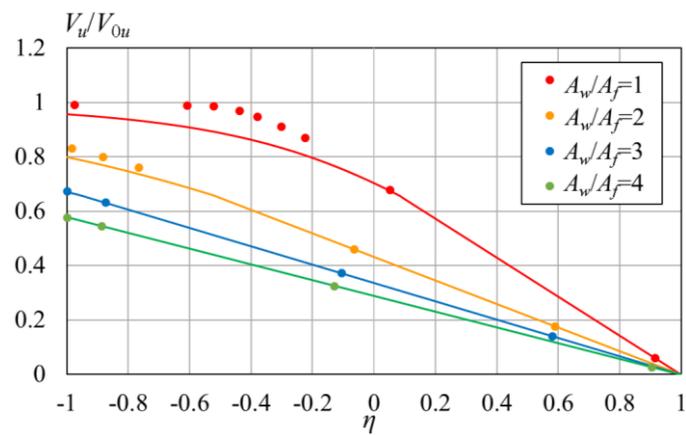


$V_u/V_{0u}-\eta$  關係

(a)  $a_L/b_w=1$



$M_{1u}/M_{0u}-\eta$  關係



$V_u/V_{0u}-\eta$  關係

(b)  $a_L/b_w=3$

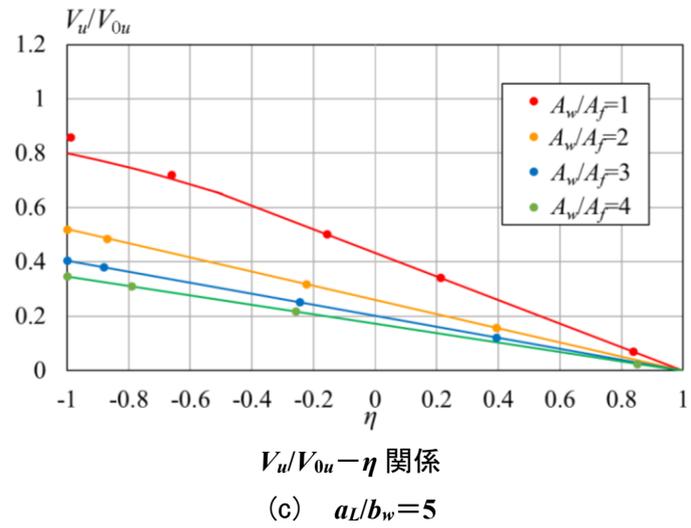
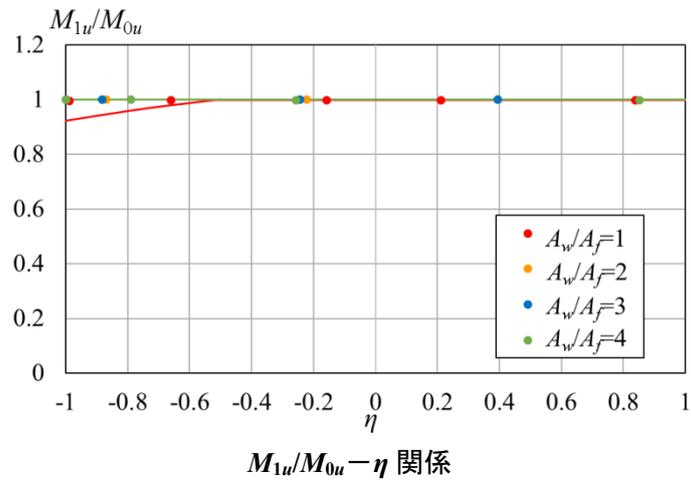
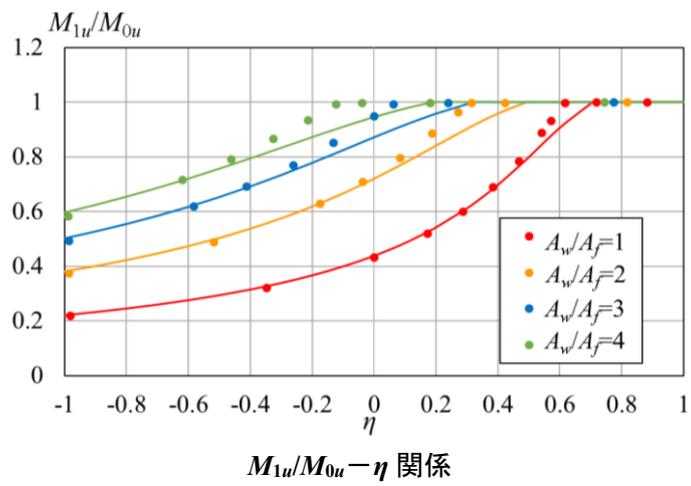
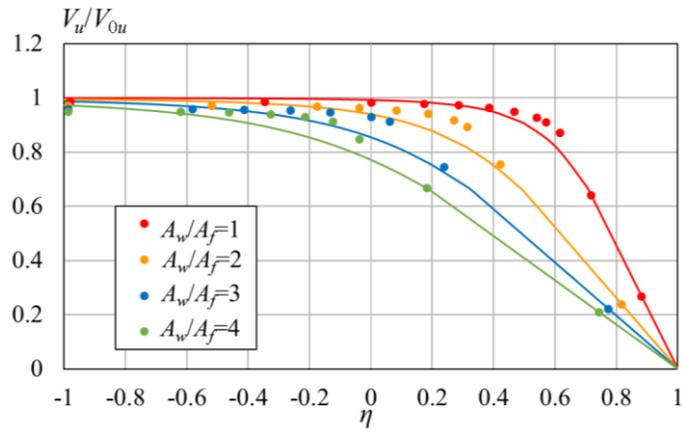


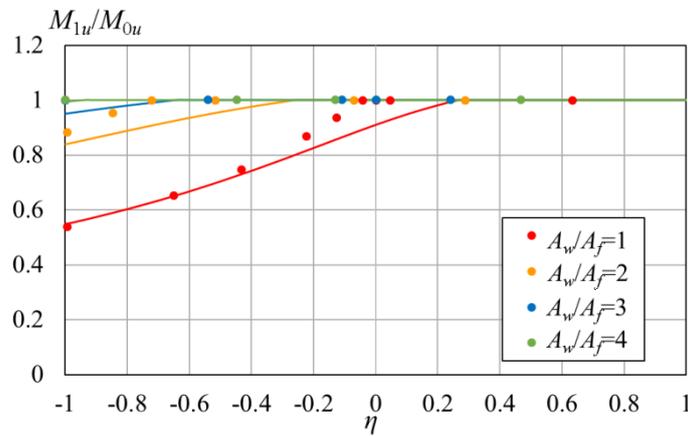
図 4.4 耐荷力とモーメント比の関係 [ $b_w/t_w=26.7$ ]



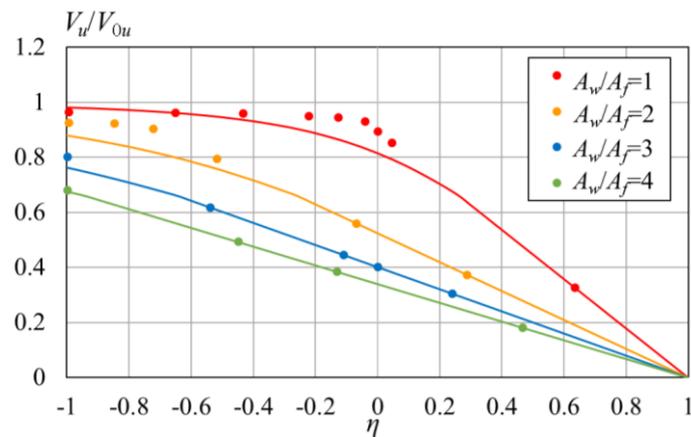


$V_u/V_{0u}-\eta$  關係

(a)  $a_L/b_w=1$



$M_{1u}/M_{0u}-\eta$  關係



$V_u/V_{0u}-\eta$  關係

(b)  $a_L/b_w=3$

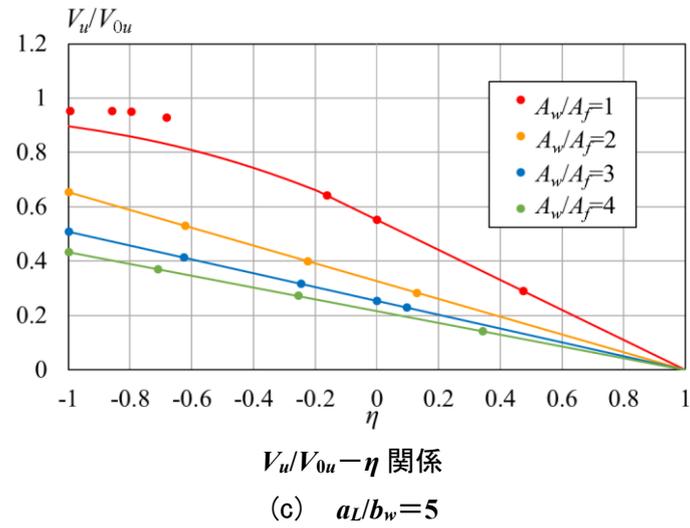
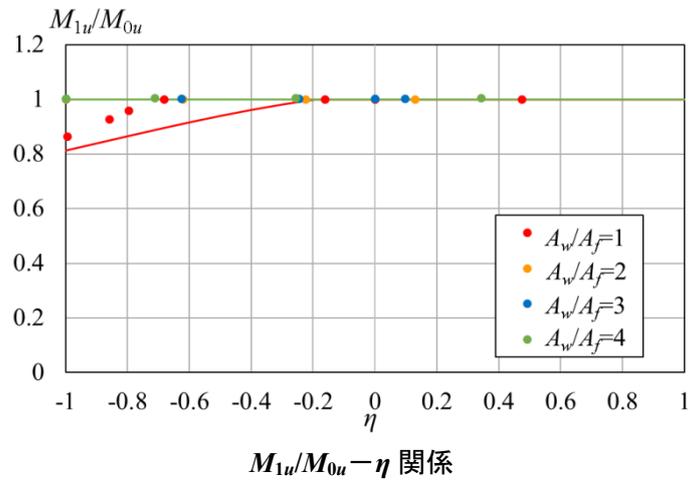
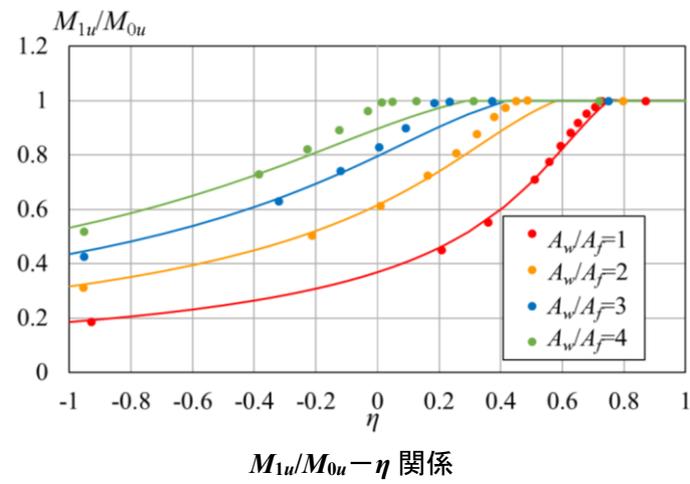
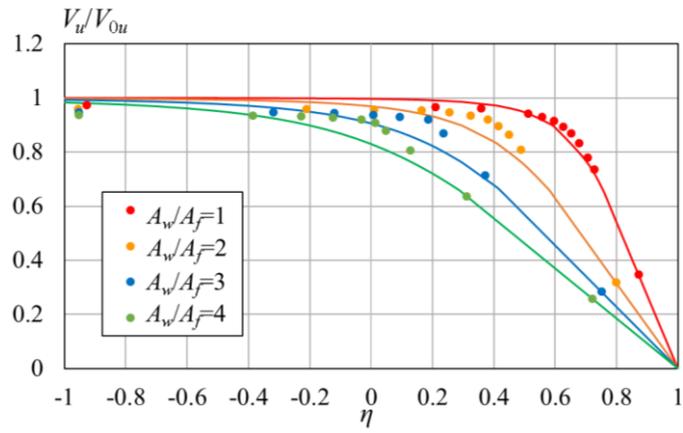


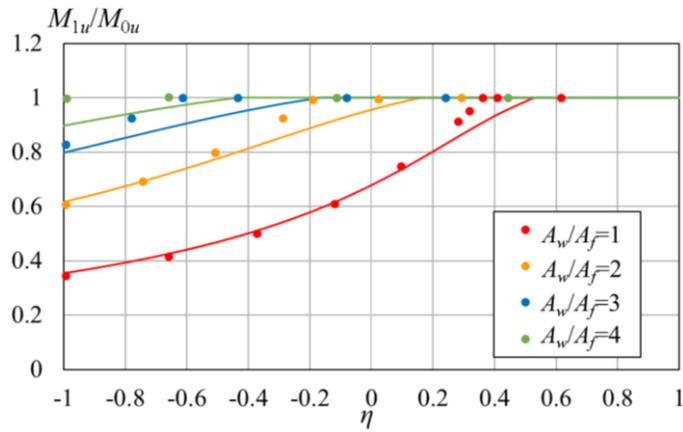
図 4.5 耐荷力とモーメント比の関係 [ $b_w/t_w=73.8$ ]



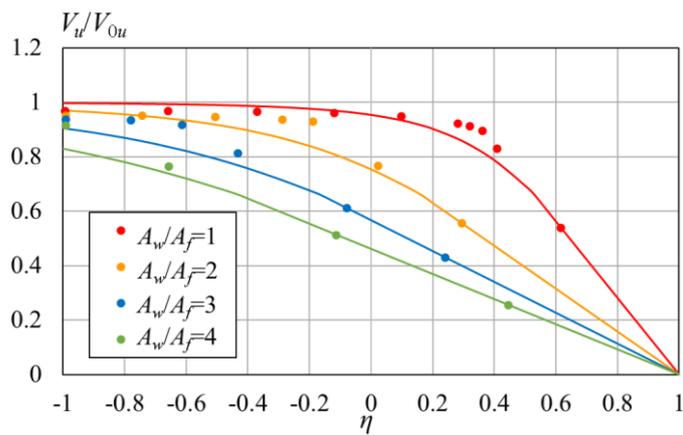


$V_u/V_{0u}-\eta$  關係

(a)  $a_L/b_w=1$



$M_{1u}/M_{0u}-\eta$  關係



$V_u/V_{0u}-\eta$  關係

(b)  $a_L/b_w=3$

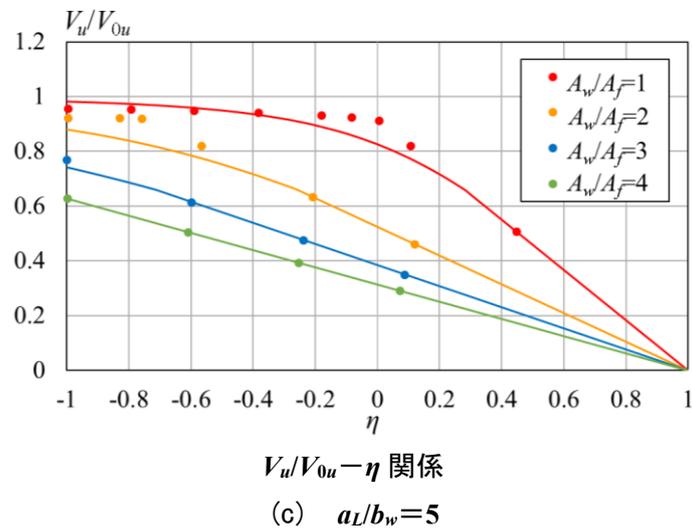
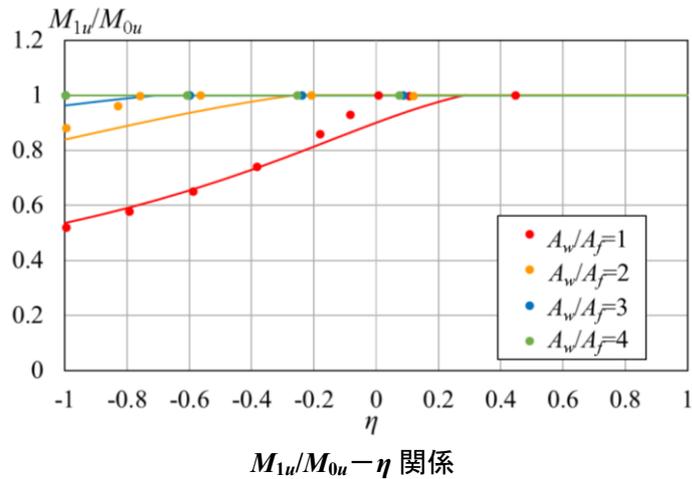


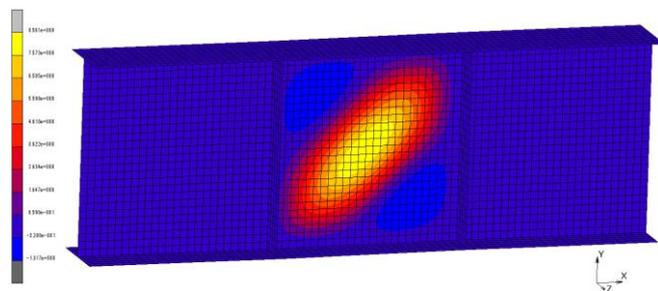
図 4.6 耐力力とモーメント比の関係 [ $b_w/t_w=150$ ]

#### 4.1.3 ウェブの面外変形

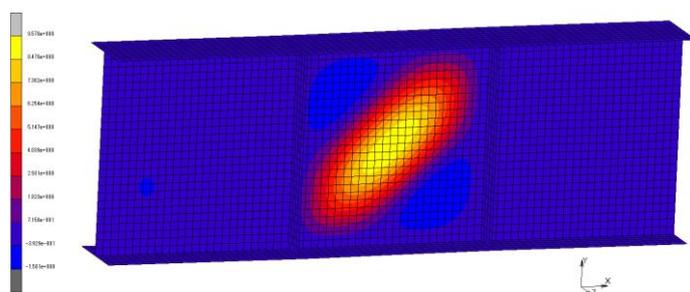
$b_w/t_w=73.8$  で  $A_w/A_f=1$  に対するウェブの面外変形を図 4.7~4.9 に示す. これらの図は  $a_L/b_w$  の値が異なる. さらに, 各図の図(a), (b), (c), (d), (e)は曲げとせん断の組合わせ ( $M_{1u}/M_{0u}$ ,  $V_u/V_{0u}$ ) が異なる. 図(a)は純せん断載荷, 図(e)は等曲げ載荷に対するウェブの面外変形である. ウェブの面外変形に関して, 図より次の傾向が確認できる.

- (1) 各図の図(b)と(c)に示すように,  $V_u/V_{0u}$  が 1 に近い場合, ウェブの面外変形は, 純せん断載荷に対する図(a)のそれに類似する.
- (2) 各図の図(d)に示すように,  $M_{1u}/M_{0u}=1$  で,  $V_u/V_{0u}$  が 0 に近い場合, 支点間のウェブの面外変形は, せん断の影響を受けるため, 等曲げ載荷に対する図(e)のそれと少し異なった面外変形になる.
- (3) 桁の両端の張出しは等曲げを受けるので, 各図の図(d)に示すように, 曲げモーメント  $M_1$  を受ける左側の張出しのウェブの面外変形は, 等曲げ載荷に対する図(e)の左側の張

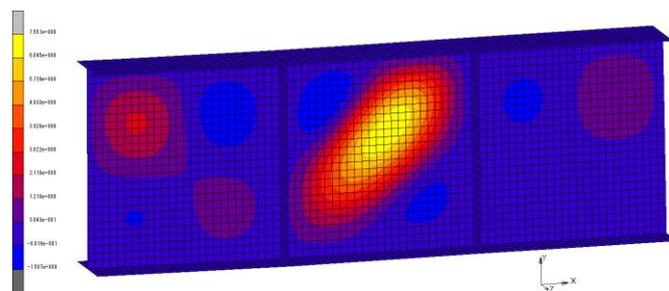
出しのウェブのそれに類似する。したがって、不等曲げ载荷において、左側の張出しに生じる曲げモーメント  $M_1$  が  $M_{0u}$  に達した時、桁が崩壊し、 $V_u/V_{0u}$  のある値以下で  $M_{1u}/M_{0u} = 1$  になる。



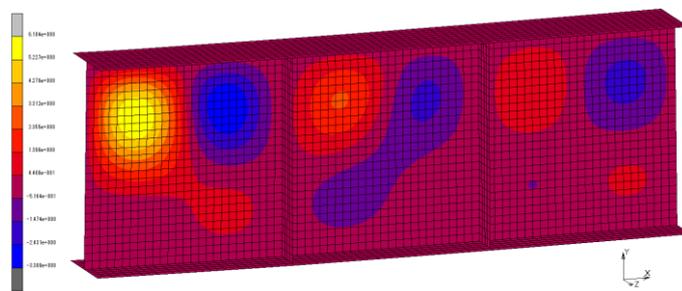
(a)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (0, 1)$



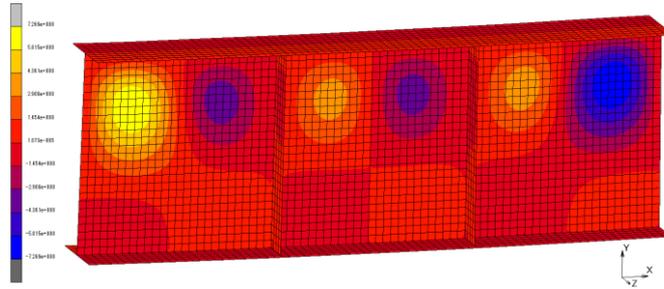
(b)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (0.219, 0.986)$  [ $\eta = -0.981$ ]



(c)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (0.933, 0.911)$  [ $\eta = 0.570$ ]

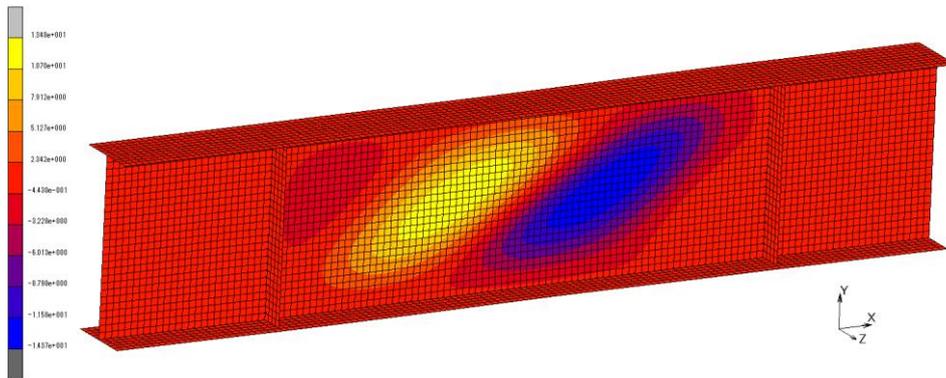


(d)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (0.999, 0.269)$  [ $\eta = 0.881$ ]

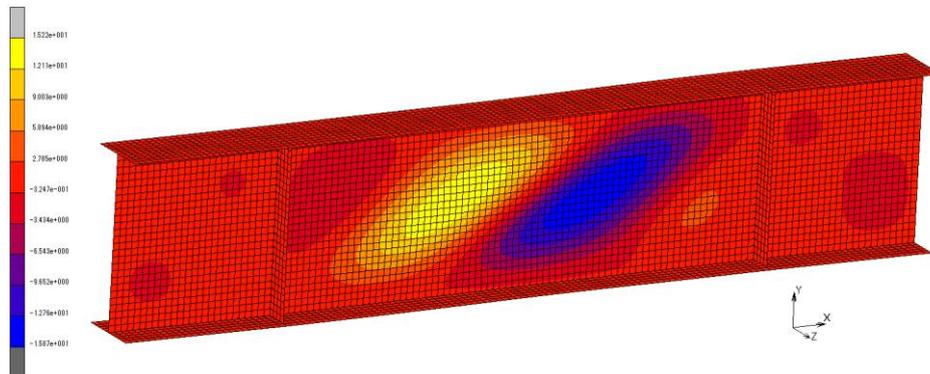


(e)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (1, 0) [\eta=1]$

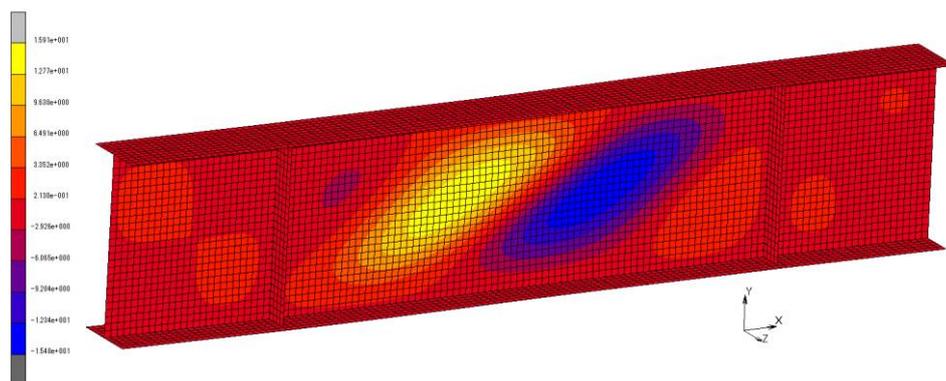
図 4.7 ウェブの面外変形  $[a_L/b_w=1]$



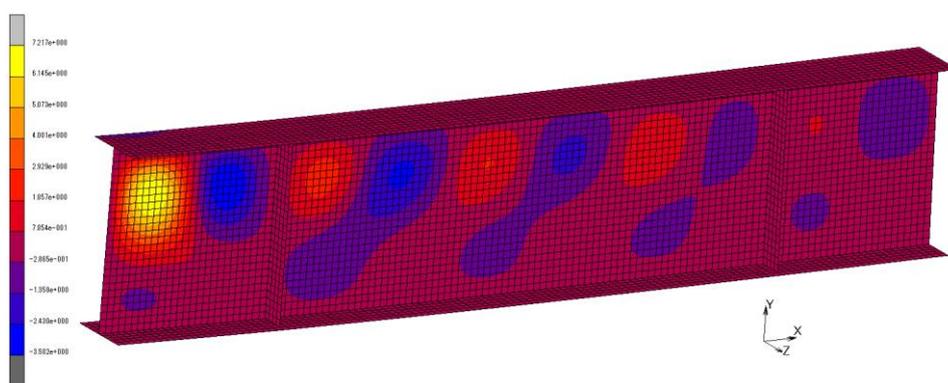
(a)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (0, 1)$



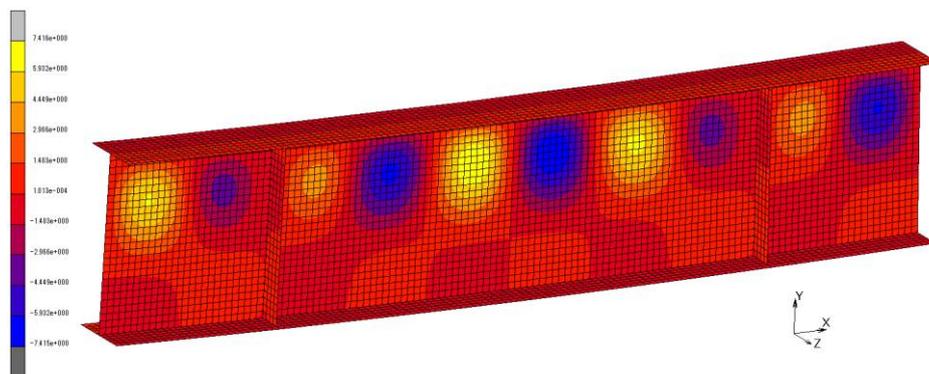
(b)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (0.541, 0.965) [\eta=-0.995]$



(c)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (0.653, 0.964) [\eta = -0.651]$

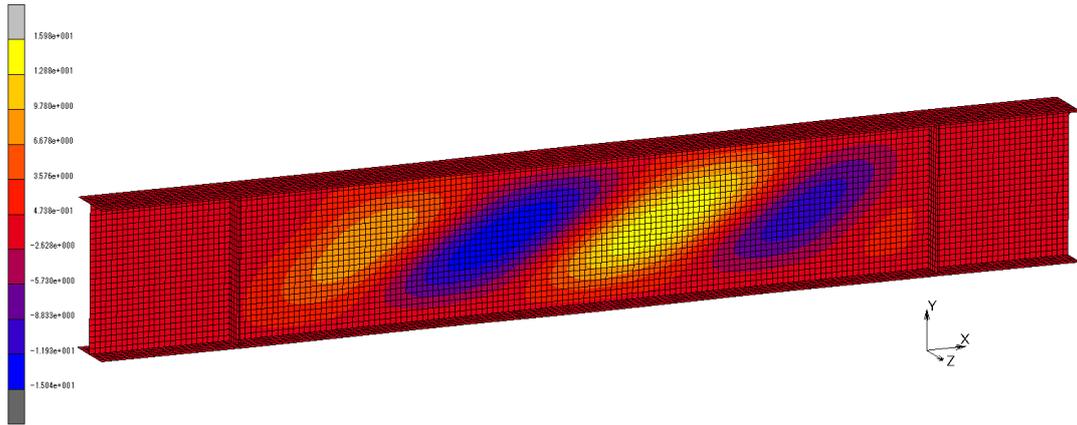


(d)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (1.001, 0.328) [\eta = 0.633]$

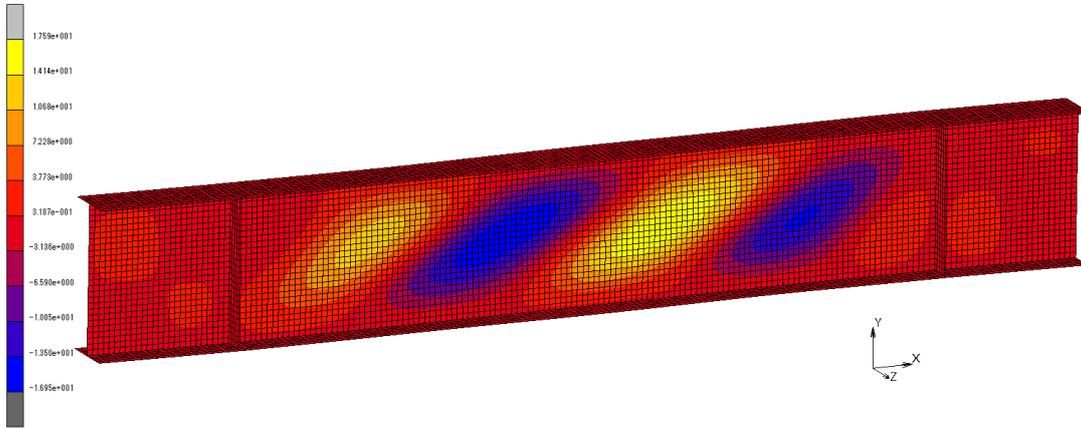


(e)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (1, 0) [\eta = 1]$

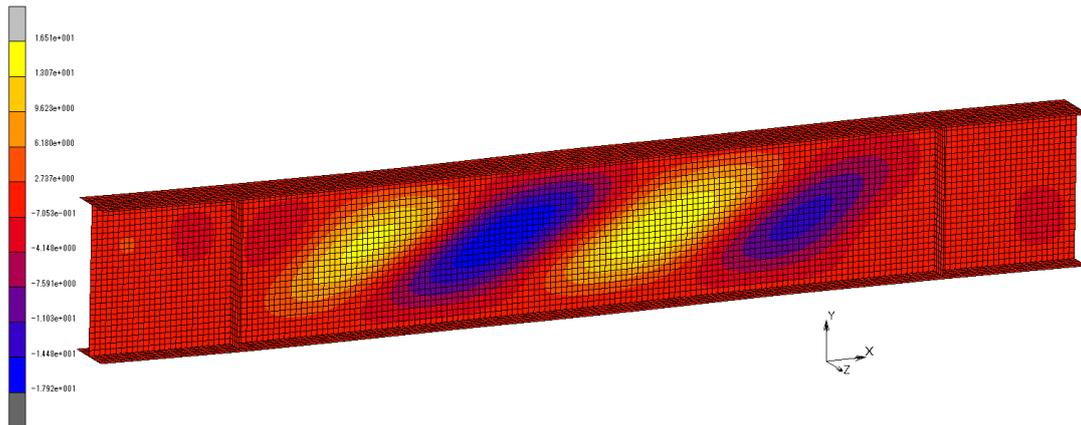
図 4.8 ウェブの面外変形  $[a_L/b_w=3]$



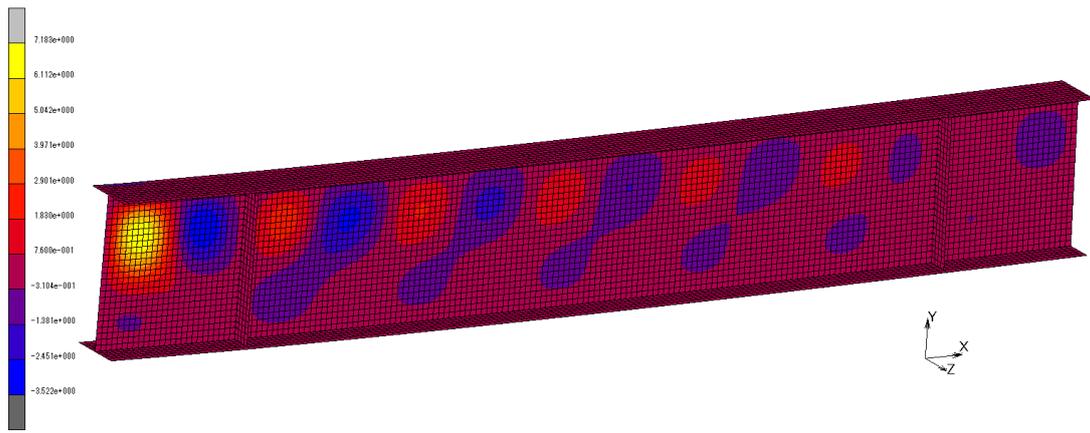
(a)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (0, 1)$



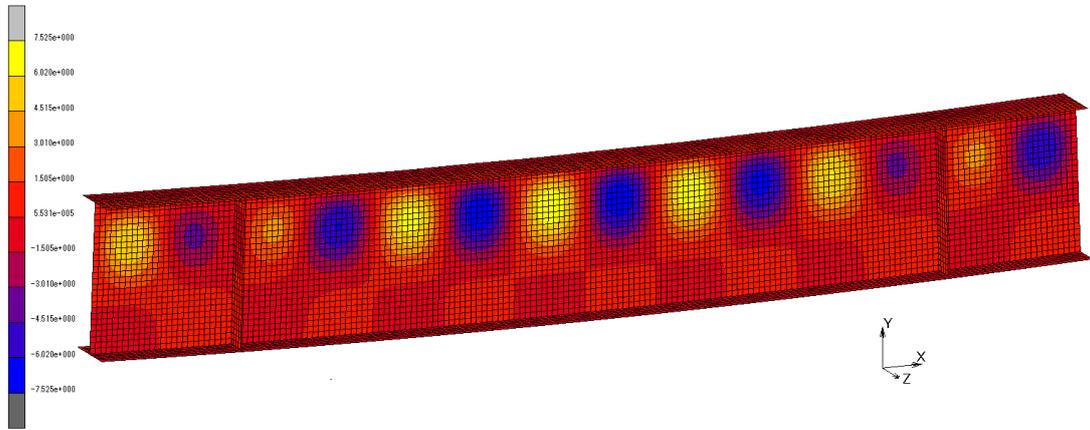
(b)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (0.865, 0.954) [\eta = -0.995]$



(c)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (0.959, 0.953) [\eta = -0.797]$



(d)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (1.001, 0.292) [\eta=0.473]$

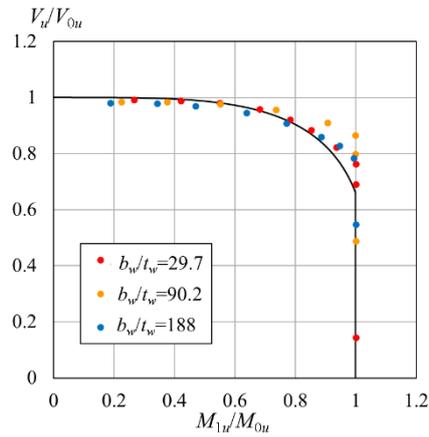


(e)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (1, 0) [\eta=1]$

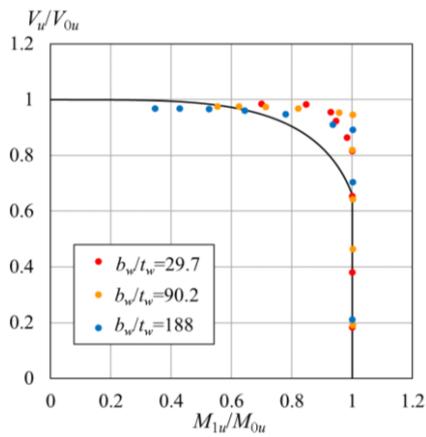
図 4.9 ウェブの面外変形 [ $a_L/b_w=5$ ]

## 4.2 A5083-O 桁

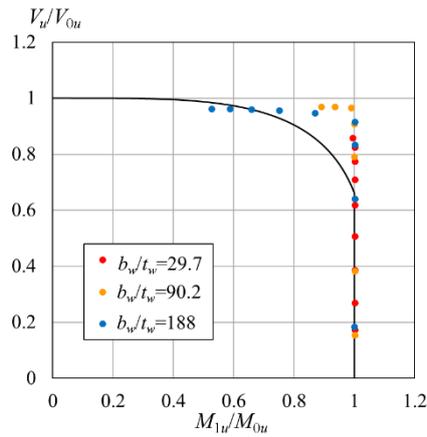
曲げとせん断の組合わせ荷重に対する耐荷力相関関係を図 4.10 に示す。  $M_{0u}/M_Y$  と  $V_{0u}/V_Y$  の値を表 4.2 に示す。 解析値の数値データを付録 B に示す。 各図に記載される曲げとせん断の耐荷力相関曲線は 4.4 節の式(4.5)で与えられ、これに対する考察は 4.4 節で与える。 図が示す耐荷力相関関係は、前節の A6061-T6 桁の傾向と同様である。



(a)  $a_L/b_w=1$



(b)  $a_L/b_w=3$



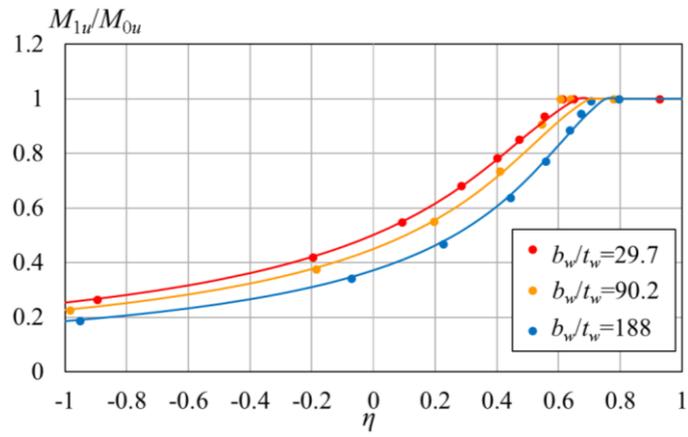
(c)  $a_L/b_w=5$

図 4.10  $M_{1u}/M_{0u}-V_u/V_{0u}$  関係

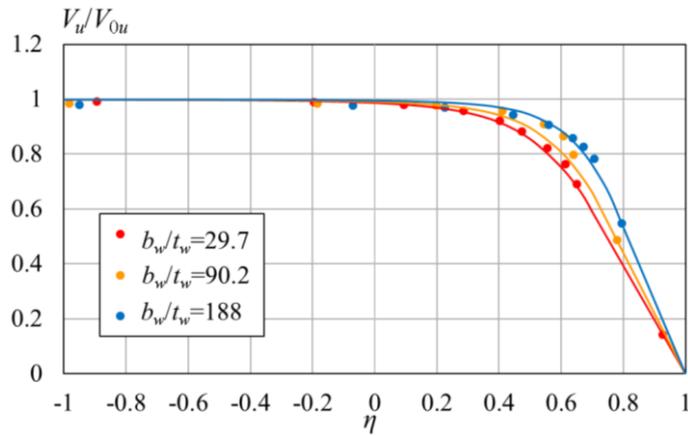
表 4.2  $M_{0u}/M_Y$  と  $V_{0u}/V_Y$  の値

		$a_L/b_w=1$	$a_L/b_w=3$	$a_L/b_w=5$	
$b_w/t_w=29.7$	$A_w/A_f=1$	$M_{0u}/M_Y$	1.152	1.152	1.152
		$V_{0u}/V_Y$	1.168	1.076	1.060
		$M_Y$ (N・mm)	3558632875		
		$V_Y$ (N)	1978926		
$b_w/t_w=90.2$	$A_w/A_f=1$	$M_{0u}/M_Y$	1.062	1.061	1.061
		$V_{0u}/V_Y$	0.964	0.798	0.778
		$M_Y$ (N・mm)	1174920500		
		$V_Y$ (N)	650962		
$b_w/t_w=188$	$A_w/A_f=1$	$M_{0u}/M_Y$	0.969	0.969	0.969
		$V_{0u}/V_Y$	0.731	0.463	0.427
		$M_Y$ (N・mm)	567746750		
		$V_Y$ (N)	312462		

$M_{1u}/M_{0u}$  と  $\eta$  の関係および  $V_u/V_{0u}$  と  $\eta$  の関係を図 4.11 に示す。  $M_{1u}/M_{0u}-\eta$  曲線および  $V_u/V_{0u}-\eta$  曲線は、4.4 節の式(4.6)で与えられ、これらに対する考察は 4.4 節で与える。図が示す耐荷力とモーメント比の関係は、前節の A6061-T6 桁の傾向と同様である。

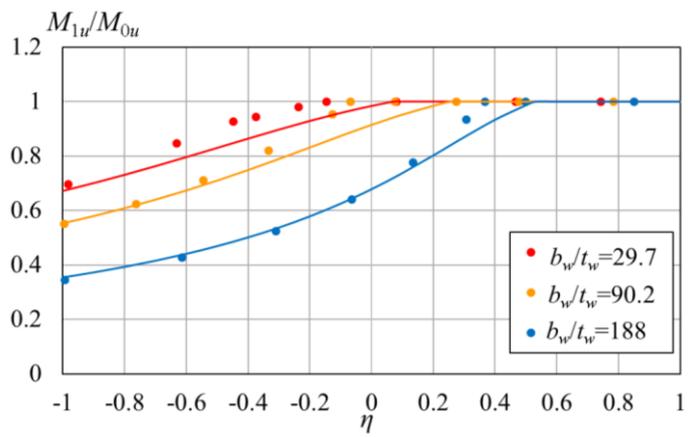


$M_{1u}/M_{0u}-\eta$  關係

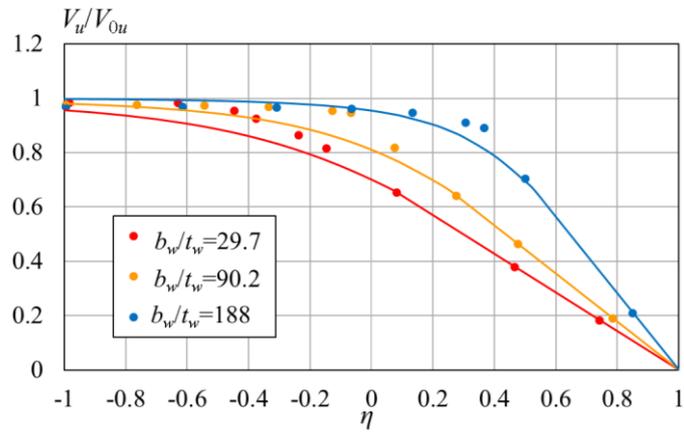


$V_u/V_{0u}-\eta$  關係

(a)  $a_L/b_w=1$

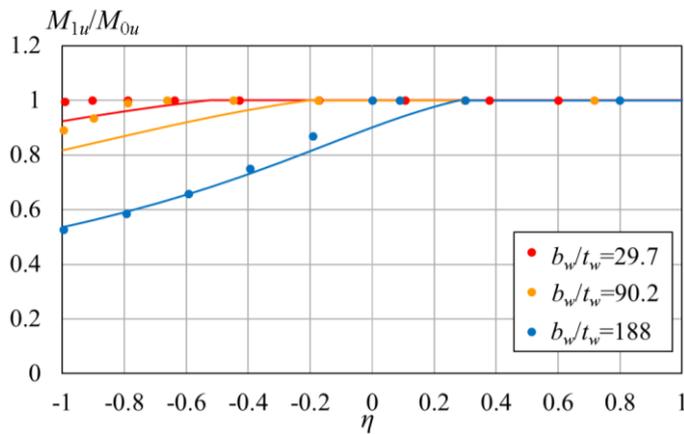


$M_{1u}/M_{0u}-\eta$  關係

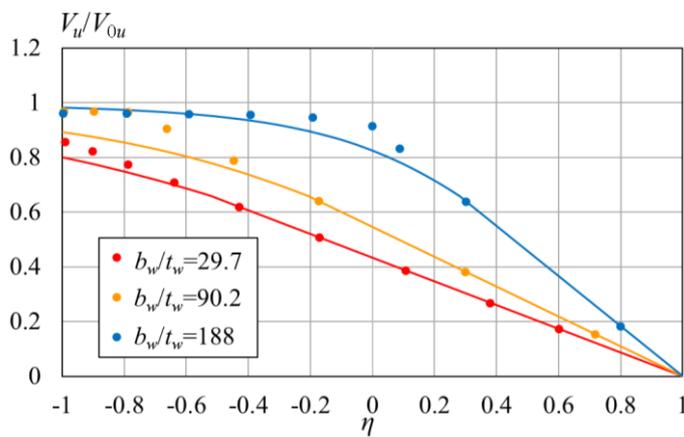


$V_u/V_{0u}-\eta$  関係

(b)  $a_L/b_w=3$



$M_{1u}/M_{0u}-\eta$  関係



$V_u/V_{0u}-\eta$  関係

(c)  $a_L/b_w=5$

図 4.11 耐荷力と曲げモーメント比の関係

### 4.3 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁

中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁の解析モデルを図 4.12 に示す。桁の断面寸法は、表 2.1 に示す、A5083-O の  $b_w/t_w=29.7, 90.2, 188$  の 3 種類で、上下フランジと支点上補剛材とで囲まれたウェブの縦横比  $a_L/b_w$  に対して 1, 3, 5 を考慮する。中間垂直補剛材はウェブの片面にのみに設けられ、上下フランジと隣接する中間垂直補剛材とで囲まれたウェブの縦横比  $a/b_w$  を 1 とする。 $a_L/b_w=1$  の場合、支点上補剛材のみが設けられ、中間垂直補剛材は設けられない。道路橋示方書<sup>9)</sup>では、中間垂直補剛材は下フランジに適当な間隔を開けて取り付けることが規定されているので、中間垂直補剛材の下端と下フランジの中央面の間隔を 40mm 程開けている。

中間垂直補剛材の断面寸法は、道路橋示方書<sup>9)</sup>で規定される次式において等号が成立する場合を採用する。

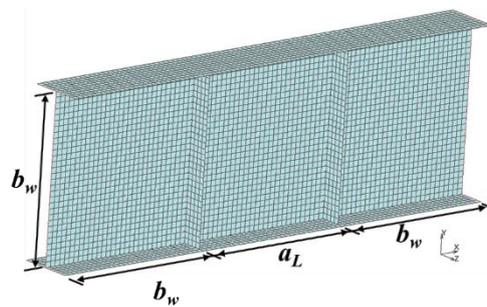
$$I_v \geq \frac{b_w t_w^3}{11} \gamma_{v.req} \quad (4.3)$$

$$\gamma_{v.req} = 8.0 \left( \frac{b_w}{a} \right)^2 \quad (4.4)$$

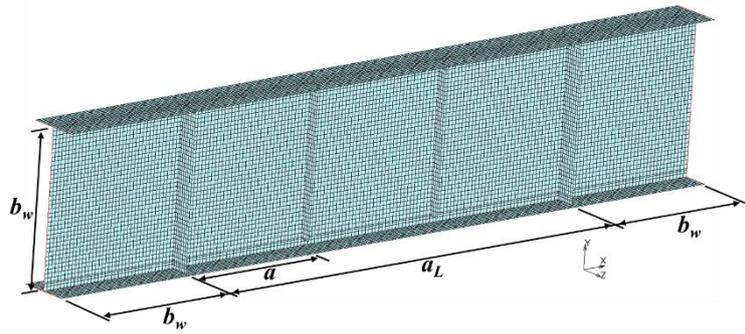
ここに、 $I_v$  : 中間垂直補剛材の断面二次モーメント

$\gamma_{v.req}$  : 必要剛比

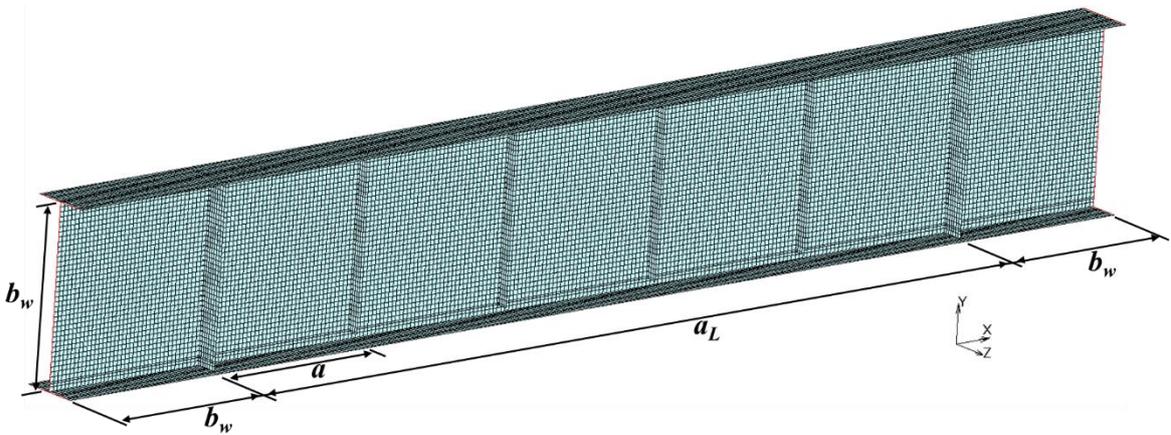
さらに、中間垂直補剛材に局部座屈が生じないようにするために、中間垂直補剛材の幅厚比を 5.82 とする (2.2 節参照)。以上を満たす中間垂直補剛材の板幅  $b_v$  と板厚  $t_v$  を表 4.3 に示す。



(a)  $a_L/b_w=1$



(b)  $a_L/b_w=3$



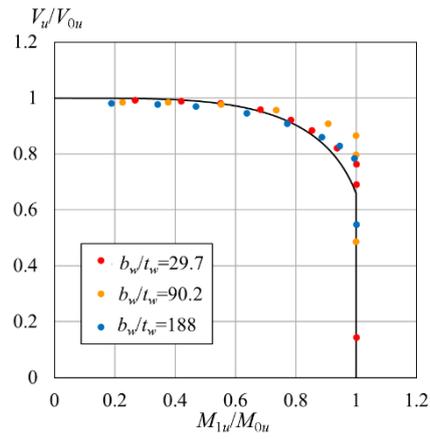
(c)  $a_L/b_w=5$

図 4.12 中間垂直補剛材を有する桁

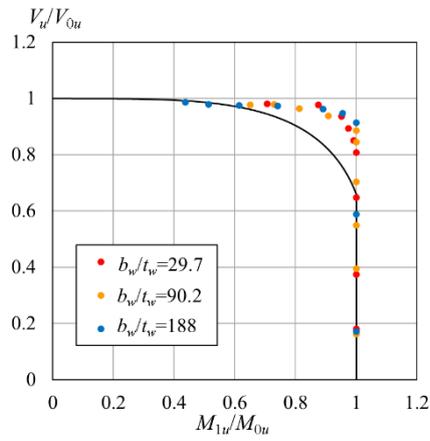
表 4.3 中間垂直補剛材の板幅  $b_v$  と板厚  $t_v$

	$b_w/t_w=29.7$	$b_w/t_w=90.2$	$b_w/t_w=188$
$b_v$	133.9	58.2	33.7
$t_v$	23.0	10.0	5.8

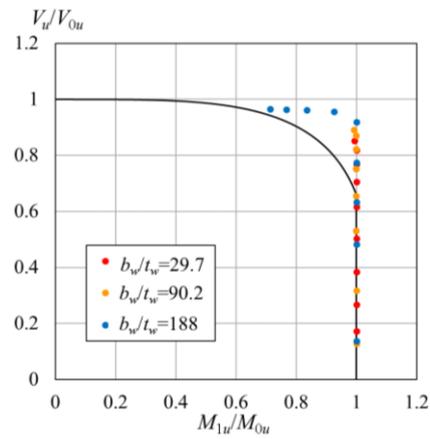
曲げとせん断の組合わせ荷重に対する耐荷力相関関係を図 4.13 に示す。図 4.13(a)は図 4.10(a)と同じである。解析値の数値データを付録 C に示す。  $M_{0u}/M_Y$  と  $V_{0u}/V_Y$  の値を表 4.4 に示す。  $M_{0u}$  と  $V_{0u}$  は、図 4.12 に示す解析モデルに対して得られた値である。各図に記載される曲げとせん断の相関曲線は 4.4 節の式(4.5)で与えられ、これに対する考察は 4.4 節で与える。図が示す耐荷力相関関係は、前節の A5083-O 桁と同様の傾向を示す。



(a)  $a_L/b_w=1$



(b)  $a_L/b_w=3$



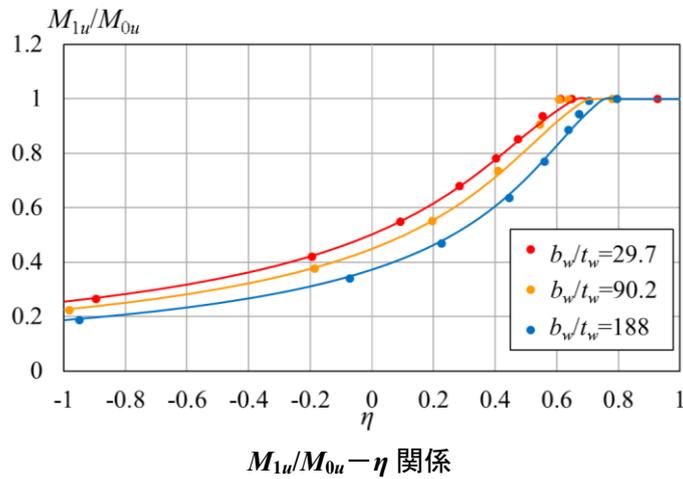
(c)  $a_L/b_w=5$

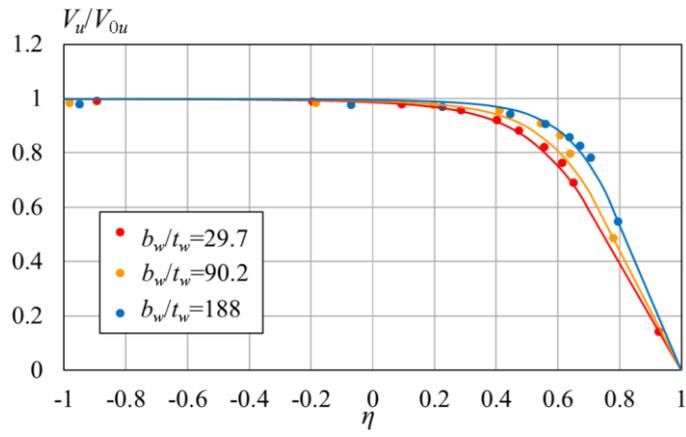
図 4.13  $M_{1u}/M_{0u} - V_u/V_{0u}$  関係

表 4.4  $M_{0u}/M_Y$  と  $V_{0u}/V_Y$  の値

			$a_L/b_w=1$	$a_L/b_w=3$	$a_L/b_w=5$
$b_w/t_w=29.7$	$A_w/A_f=1$	$M_{0u}/M_Y$	1.152	1.153	1.152
		$V_{0u}/V_Y$	1.168	1.086	1.068
		$M_Y$ (N・mm)	3558632875		
		$V_Y$ (N)	1978926		
$b_w/t_w=90.2$	$A_w/A_f=1$	$M_{0u}/M_Y$	1.062	1.062	1.061
		$V_{0u}/V_Y$	0.964	0.937	0.941
		$M_Y$ (N・mm)	1174920500		
		$V_Y$ (N)	650962		
$b_w/t_w=188$	$A_w/A_f=1$	$M_{0u}/M_Y$	0.969	0.969	0.969
		$V_{0u}/V_Y$	0.731	0.575	0.577
		$M_Y$ (N・mm)	567746750		
		$V_Y$ (N)	312462		

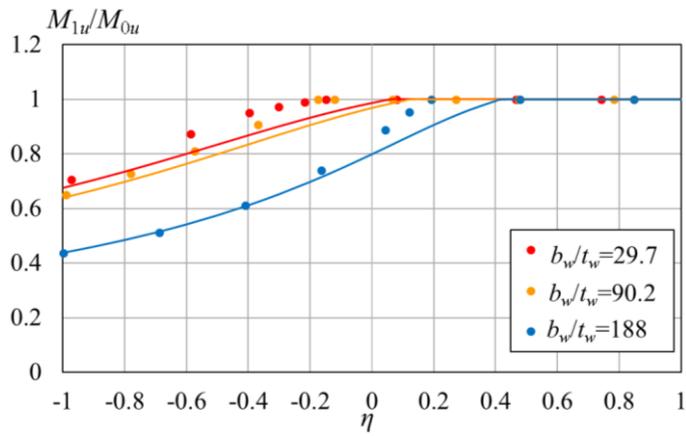
$M_{1u}/M_{0u}$  と  $\eta$  の関係および  $V_u/V_{0u}$  と  $\eta$  の関係を図 4.14 に示す。 $M_{1u}/M_{0u}-\eta$  曲線および  $V_u/V_{0u}-\eta$  曲線は、4.4 節の式(4.6)で与えられ、これらに対する考察は 4.4 節で与える。耐荷力とモーメント比の関係は、前節の A5083-O 桁と同様の傾向を示す。



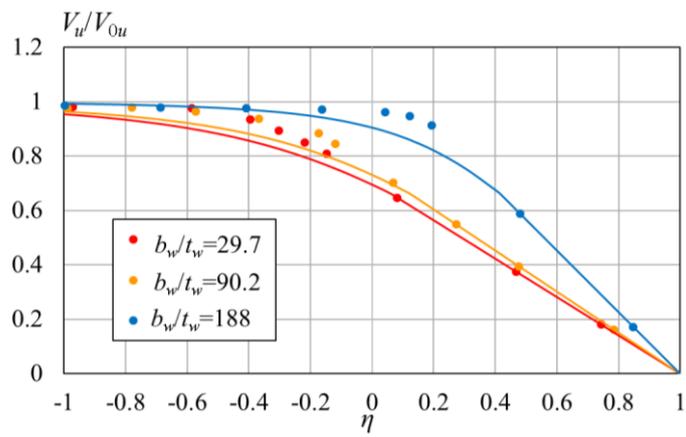


$V_u/V_{0u}-\eta$  関係

(a)  $a_L/b_w = 1$



$M_{1u}/M_{0u}-\eta$  関係



$V_u/V_{0u}-\eta$  関係

(b)  $a_L/b_w = 3$

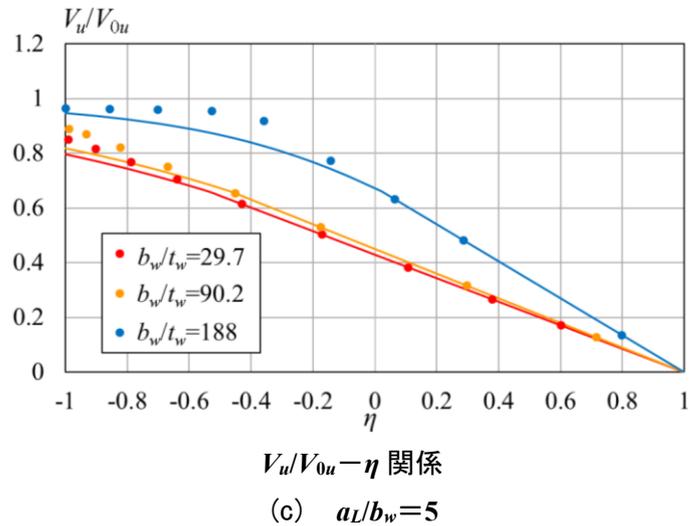
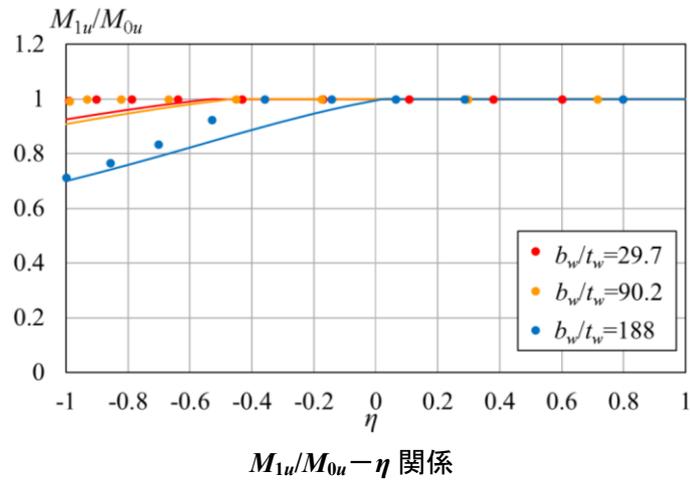
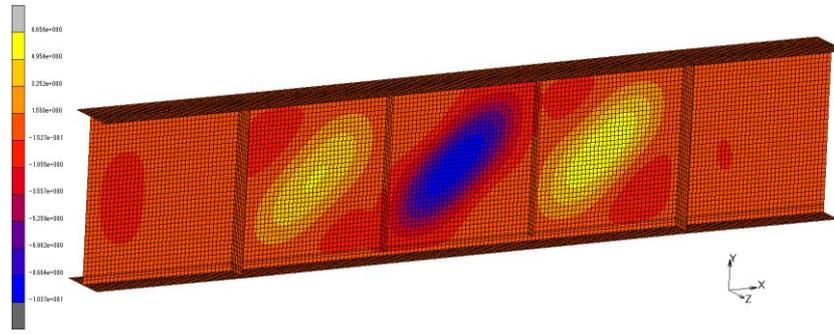
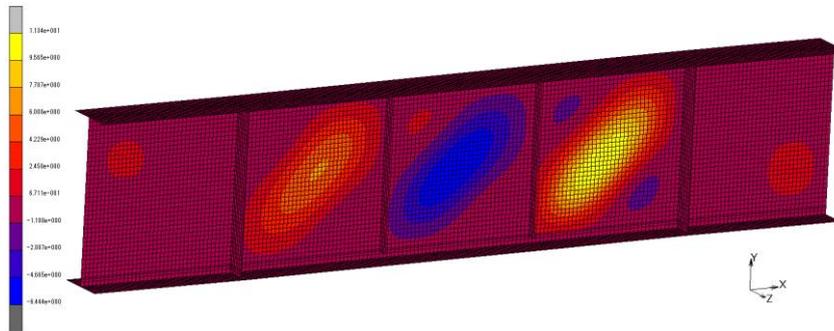


図 4.14 耐荷力とモーメント比の関係

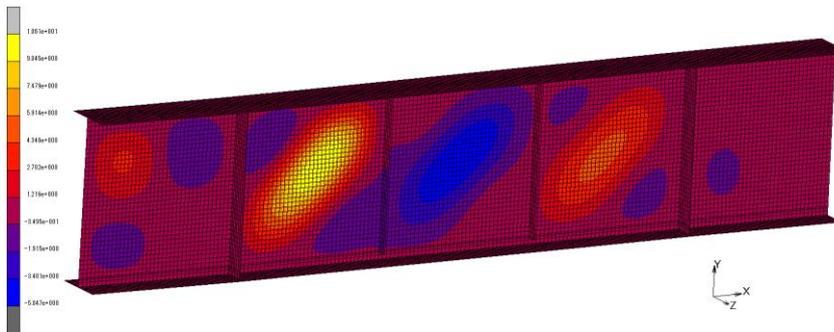
$a_L/b_w=3$  で、 $b_w/t_w=90.2$  に対するウェブの面外変形を図 4.15 に示す。図 (a), (b), (c), (d), (e) は曲げとせん断の組合わせ ( $M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}$ ) が異なる。図 (a) は純せん断荷荷、図 (e) は等曲げ荷荷に対するウェブの面外変形である。ウェブの面外変形は、中間垂直補剛材の位置で節になっていることが分かる。



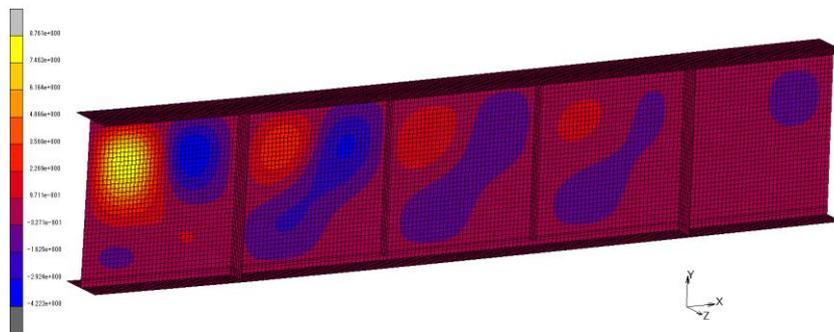
(a)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (0, 1)$



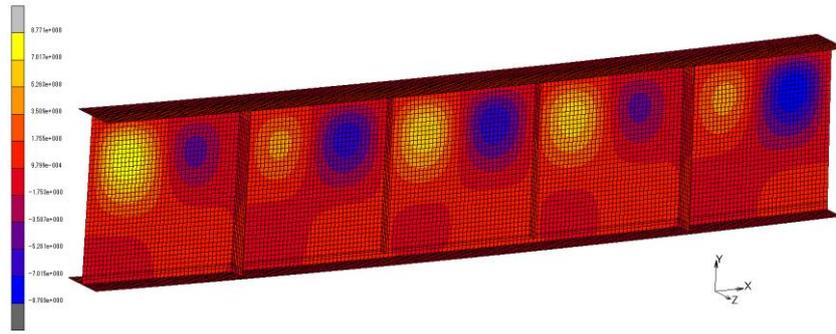
(b)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (0.654, 0.982) [\eta = -0.989]$



(c)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (0.907, 0.947) [\eta = -0.381]$



(d)  $(M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (1.000, 0.396) [\eta = 0.475]$



$$(e) \quad (M_{1u}/M_{0u}, V_u/V_{0u}) = (1, 0) \quad [\eta=1]$$

図 4.15 ウェブの面外変形 [ $a_L/b_w=3$ ,  $b_w/t_w=90.2$ ]

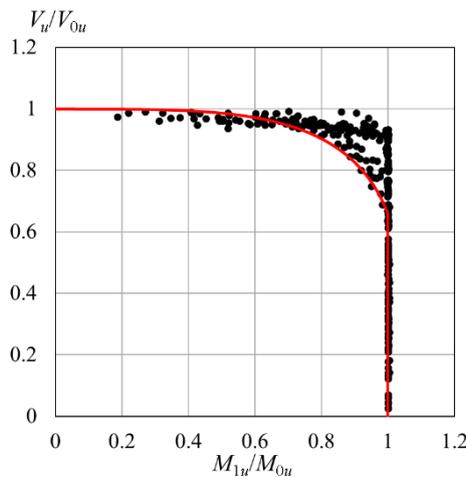
#### 4.4 曲げとせん断の耐荷力相関式および耐荷力とモーメント比式

曲げとせん断の組み合わせ荷重に対する耐荷力相関関係を図 4.16 に示す. 図 4.16 (a), (b), (c) は, それぞれ A6061-T6 桁の全解析値, 中間垂直補剛材を持たない A5083-O 桁の全解析値, 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁の全解析値を示す. 図中の実線は, 曲げとせん断の組み合わせ荷重に対する耐荷力相関曲線であり, 次式で与えられる.

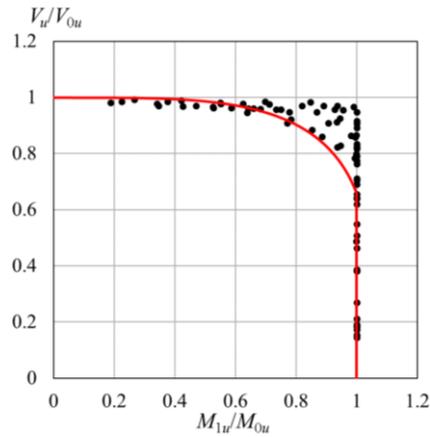
$$0.8103 \left( \frac{M_{1u}}{M_{0u}} \right)^4 + \left( \frac{V_u}{V_{0u}} \right)^4 = 1 \quad \left( 0.66 \leq \frac{V_u}{V_{0u}} \leq 1 \right) \quad (4.5a)$$

$$\frac{M_{1u}}{M_{0u}} = 1 \quad \left( 0 \leq \frac{V_u}{V_{0u}} \leq 0.66 \right) \quad (4.5b)$$

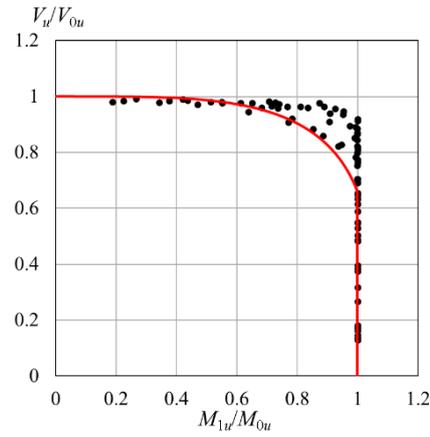
式(4.5a)は,  $M_{1u}/M_{0u}$  と  $V_u/V_{0u}$  が 1 に近い領域で, 相関曲線が A6061-T6 桁の全プロット点の内側を通過するように決められている. 式(4.5)と異なる式が与える耐荷力相関式と解析値の比較を付録 D に示す.



(a) A6061-T6 桁



(b) 中間垂直補剛材を持たない A5083-O 桁



(c) 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁

図 4.16 耐荷力相関関係

式(4.5)と(2.2)より, 次の  $M_{1u}/M_{0u}-\eta$  式および  $V_u/V_{0u}-\eta$  式を得る.  
 $-1 \leq \eta \leq e$  の場合,

$$\frac{M_{1u}}{M_{0u}} = \frac{1}{\left\{ 0.8103 + \left( \frac{1-\eta}{a_L/b_w} \frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}} \right)^4 \right\}^{0.25}} \quad (4.6a)$$

$$\frac{V_u}{V_{0u}} = \frac{\frac{1-\eta}{a_L/b_w} \frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}}}{\left\{ 0.8103 + \left( \frac{1-\eta}{a_L/b_w} \frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}} \right)^4 \right\}^{0.25}} \quad (4.6b)$$

$e \leq \eta \leq 1$  の場合,

$$\frac{M_{1u}}{M_{0u}} = 1 \quad (4.6c)$$

$$\frac{V_u}{V_{0u}} = \frac{1-\eta}{a_L/b_w} \frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}} \quad (4.6d)$$

$$\text{ここに, } e = 1 - 0.66 \frac{a_L}{b_w} \frac{b_w V_{0u}}{M_{0u}} \quad (4.6e)$$

$e$  が  $-1$  未満の場合,  $\eta = -1$  で, 既に  $M_{1u}/M_{0u} = 1$  になっているので,  $M_{1u}/M_{0u} - \eta$  関係および  $V_u/V_{0u} - \eta$  関係は, それぞれ式(4.6c)と(4.6d)で与えられる.

式(4.6)の各式の  $M_{0u}/(b_w V_{0u})$  の値を表 4.5 に示す.

表 4.5  $M_{0u}/(b_w V_{0u})$  の値

(a) A6061-T6 桁

		$a_L/b_w=1$	$a_L/b_w=3$	$a_L/b_w=5$
$b_w/t_w=26.7$	$A_w/A_f=1$	1.968	2.150	2.169
	$A_w/A_f=2$	1.256	1.299	1.300
	$A_w/A_f=3$	0.995	1.012	1.012
	$A_w/A_f=4$	0.857	0.867	0.867
$b_w/t_w=73.8$	$A_w/A_f=1$	2.270	2.684	2.763
	$A_w/A_f=2$	1.307	1.574	1.636
	$A_w/A_f=3$	0.980	1.205	1.275
	$A_w/A_f=4$	0.817	1.020	1.086
$b_w/t_w=150$	$A_w/A_f=1$	2.703	4.214	4.590
	$A_w/A_f=2$	1.573	2.362	2.622
	$A_w/A_f=3$	1.137	1.702	1.923
	$A_w/A_f=4$	0.925	1.382	1.572

(b) 中間垂直補剛材を持たない A5083-O 桁

		$a_L/b_w=1$	$a_L/b_w=3$	$a_L/b_w=5$
$b_w/t_w=29.7$	$A_w/A_f=1$	1.967	2.136	2.166
$b_w/t_w=90.2$	$A_w/A_f=1$	2.204	2.659	2.729
$b_w/t_w=188$	$A_w/A_f=1$	2.669	4.217	4.575

(c) 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁

		$a_l/b_w=1$	$a_l/b_w=3$	$a_l/b_w=5$
$b_w/t_w=29.7$	$A_w/A_f=1$	1.967	2.116	2.150
$b_w/t_w=90.2$	$A_w/A_f=1$	2.204	2.266	2.256
$b_w/t_w=188$	$A_w/A_f=1$	2.669	3.394	3.381

図 4.16 の各図で、 $V_u/V_{0u}$  が 1 に近い領域で、プロット点が耐荷力相関曲線を下回る場合がある。図 4.4, 4.5, 4.6, 4.11, 4.14 に示すように、これは、 $\eta$  が -1 に近いとき、 $V_u/V_{0u}$  の解析値が  $V_u/V_{0u}-\eta$  曲線を下回るからである。 $\eta$  が -1 に近い場合を除いて、式(4.6)が与える  $M_{1u}/M_{0u}-\eta$  曲線および  $V_u/V_{0u}-\eta$  曲線はプロット点の近傍を通過している。したがって、 $V_u/V_{0u}$  が 1 に近い領域で、耐荷力相関曲線を下回るプロット点は、 $\eta$  が -1 に近い解析値に限られる。

アルミニウム合金材の相違、ならびにウェブの幅厚比  $b_w/t_w$ 、ウェブとフランジの断面積比  $A_w/A_f$ 、上下フランジと支点上補剛材とで囲まれたウェブの縦横比  $a_l/b_w$ 、中間垂直補剛材を有する桁の場合には、上下フランジと隣接する中間垂直補剛材とで囲まれたウェブの縦横比  $a/b_w$  などの因子は、等曲げ载荷に対する耐荷力  $M_{0u}$  および純せん断载荷に対する耐荷力  $V_{0u}$  で考慮され、曲げとせん断の組合わせ荷重に対する桁の耐荷力相関関係を与える式(4.5)および耐荷力とモーメント比の関係を与える式(4.6)は、これらの因子によって変動しない。

## 第5章 不等曲げ載荷と集中荷重載荷による耐荷力の比較

単純支持された桁の張出し端に不等曲げを作用させることによって、支点間の桁に曲げとせん断の組合わせ荷重を生じさせる解析モデルにおいては、 $M_1$  の等曲げを受ける張出しが、曲げとせん断の組合わせ荷重を受ける支点間の桁よりも先に終局状態を迎えるため、支点間の桁は終局状態に達しない。そこで、中央に集中荷重を受ける単純支持桁の FEM 解析を行い、これから得られる、曲げとせん断の組合わせ荷重を受ける桁の耐荷力と不等曲げを受ける張出し桁の耐荷力とを比較することにより、前章で得られた曲げとせん断の耐荷力相関式の妥当性を調べる。

中央に集中荷重を受ける単純支持桁の解析モデルを図 5.1 に示す。アルミニウム合金は A6061-T6 であり、桁の断面寸法は、表 2.1 の  $b_w/t_w=26.7, 73.8, 150$  に対して  $A_w/A_f=1$  である。曲げとせん断の組合わせを変化させるために、 $a_L/b_w$  に関しては、 $b_w/t_w=26.7$  に対して 3.9, 10,  $b_w/t_w=73.8$  に対して 1, 3, 5, 10,  $b_w/t_w=150$  に対して 8.7, 10 を考慮する。桁中央の集中荷重が作用する位置の直下に、支点上補剛材の板幅と同じで、支点上補剛材の板厚の 3 倍の板厚を有する垂直補剛材をウェブの両面に設ける。

境界条件を表 5.1 に示す。支点上の辺 AB の  $x, y, z$  軸方向の変位および辺 CD の  $y, z$  軸方向の変位を拘束する。さらに、上下フランジの辺 GH と EF の  $z$  軸方向の変位を拘束し、辺 IJ を鉛直下向きに強制変位させる。ウェブの初期たわみに対して、 $\eta=0$  の不等曲げ載荷で仮定した初期たわみを、中央の垂直補剛材に関して逆対称に与える。

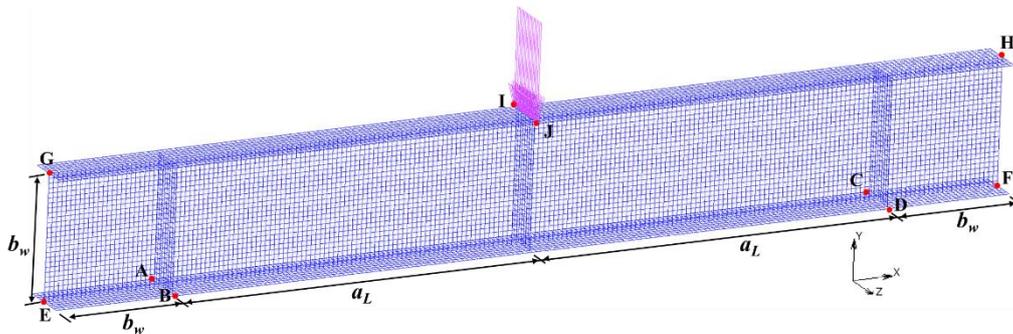


図 5.1 解析モデル

表 5.1 境界条件

	$u$	$v$	$w$
辺 IJ	—	強制変位	—
点 EF, GH	—	—	拘束
辺 AB	拘束	拘束	拘束
辺 CD	—	拘束	拘束

解析結果を表 5.2 と表 5.3 に示す. 表 5.2 の  $M_{0u}$  と  $V_{0u}$  は, 不等曲げ載荷の解析モデルで得られた, 等曲げ載荷および純せん断載荷に対する結果であり, 表 5.3 は, 不等曲げ載荷と集中荷重載荷に対する  $M_{1u}/M_{0u}$  と  $V_u/V_{0u}$  の結果である. 不等曲げ載荷に対する耐荷力は  $\eta=0$  に対する結果である. 集中荷重載荷の  $V_u$  は, FEM 解析で生じた支点反力の最大値であり,  $M_{1u}$  は  $a_L \times V_u$  で与えられる.

表 5.2  $M_{0u}/M_Y$  と  $V_{0u}/V_Y$  の値

(a)  $b_w/t_w=26.7$

	$a_L/b_w=3.9$	$a_L/b_w=10$
$M_{0u}/M_Y$	1.145	1.145
$V_{0u}/V_Y$	1.059	1.055
$M_Y$ (N · mm)	4255791120	
$V_Y$ (N)	2881183	

(b)  $b_w/t_w=73.8$

	$a_L/b_w=1$	$a_L/b_w=3$	$a_L/b_w=5$	$a_L/b_w=10$
$M_{0u}/M_Y$	1.062	1.061	1.061	1.061
$V_{0u}/V_Y$	0.939	0.794	0.771	0.764
$M_Y$ (N · mm)	1546310885			
$V_Y$ (N)	1043907			

(c)  $b_w/t_w=150$

	$a_L/b_w=8.7$	$a_L/b_w=10$
$M_{0u}/M_Y$	0.973	0.973
$V_{0u}/V_Y$	0.408	0.406
$M_Y$ (N · mm)	761704265	
$V_Y$ (N)	511514	

表 5.3  $M_{1u}/M_{0u}$  と  $V_u/V_{0u}$  の値

(a)  $b_w/t_w=26.7$

不等曲げ載荷

	$a_L/b_w=3.9$	$a_L/b_w=10$
$M_{1u}/M_{0u}$	1.000	1.000
$V_u/V_{0u}$	0.555	0.217

集中荷重載荷

	$a_L/b_w=3.9$	$a_L/b_w=10$
$M_{1u}/M_{0u}$	1.024	1.020
$V_u/V_{0u}$	0.568	0.221

(b)  $b_w/t_w=73.8$

不等曲げ載荷

	$a_L/b_w=1$	$a_L/b_w=3$	$a_L/b_w=5$	$a_L/b_w=10$
$M_{1u}/M_{0u}$	0.434	1.000	1.001	1.001
$V_u/V_{0u}$	0.984	0.895	0.553	0.279

集中荷重載荷

	$a_L/b_w=1$	$a_L/b_w=3$	$a_L/b_w=5$	$a_L/b_w=10$
$M_{1u}/M_{0u}$	0.433	1.033	1.051	1.038
$V_u/V_{0u}$	0.982	0.924	0.581	0.289

(c)  $b_w/t_w=150$

不等曲げ載荷

	$a_L/b_w=8.7$	$a_L/b_w=10$
$M_{1u}/M_{0u}$	1.001	1.000
$V_u/V_{0u}$	0.553	0.483

集中荷重載荷

	$a_L/b_w=8.7$	$a_L/b_w=10$
$M_{1u}/M_{0u}$	1.044	1.041
$V_u/V_{0u}$	0.577	0.503

不等曲げ載荷および集中荷重載荷に対する桁の耐荷力相関関係の比較を図 5.2 に示す。これは、 $b_w/t_w=73.8$  に対する結果である。 $a_L/b_w=1$  に対するプロット点は、載荷方法の違いによらず同位置にある。図 5.4(a) に示すように、両者の桁のウェブの面外変形は同じような形状を呈している。 $a_L/b_w=3$  に対するプロット点が耐荷力相関曲線から離れているのは、不等曲げ載荷に対する A6061-T6 桁の全プロット点に対して内側を通過するように耐荷力相関式が決められたからである。 $a_L/b_w=3, 5, 10$  においては、不等曲げ載荷の  $M_{1u}/M_{0u}$  は 1 であるが、集中荷重載荷の  $M_{1u}/M_{0u}$  は 1 より大きくなり、前者に対して後者は最大で 5% 程度大きい [表 5.3(b) 参照]。図 5.4(b), (c), (d) に示すように、不等曲げ載荷に対する支点間

の桁のウェブの面外変形は、集中荷重载荷に対するそれと類似しているが、両者の面外変形の大きさは異なる。

$a_L/b_w$  が 3 より大きい桁の、集中荷重载荷に対する耐荷力相関関係を図 5.3 に示す。この図は、不等曲げ载荷では  $M_{1u}/M_{0u} = 1$  になる場合に対する結果であり、 $b_w/t_w$  の値を変化させている。 $b_w/t_w = 150$  の場合、集中荷重载荷の  $M_{1u}/M_{0u}$  は不等曲げ载荷のそれより 4%程度大きい [表 5.3(c)参照]。他方、 $b_w/t_w = 26.7$  の場合、集中荷重载荷の  $M_{1u}/M_{0u}$  は不等曲げ载荷のそれより 2%程度大きい [表 5.3(a)参照]。不等曲げ载荷に対する集中荷重载荷の  $M_{1u}/M_{0u}$  の増加率は、 $b_w/t_w = 26.7$  の場合が  $b_w/t_w = 73.8, 150$  の場合より小さい。これは、 $b_w/t_w = 26.7$  のウェブを持つ桁の  $M_{0u}$  は全塑性モーメントに近いからである。

以上より、不等曲げ载荷で  $M_{1u}/M_{0u} = 1$  になる領域において、集中荷重载荷の  $M_{1u}/M_{0u}$  は不等曲げ载荷のそれより最大で 5%程度大きくなる。この増加率は、 $b_w/t_w$  の値によって異なり、桁が全塑性モーメントを形成する  $b_w/t_w$  の値に近づくとき小さくなる。

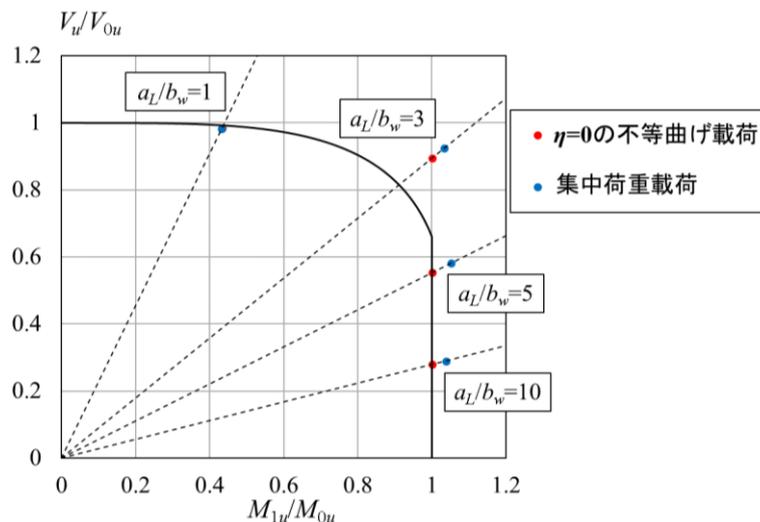


図 5.2 不等曲げ载荷と集中荷重载荷に対する耐荷力相関関係の比較 [ $b_w/t_w = 73.8$ ]

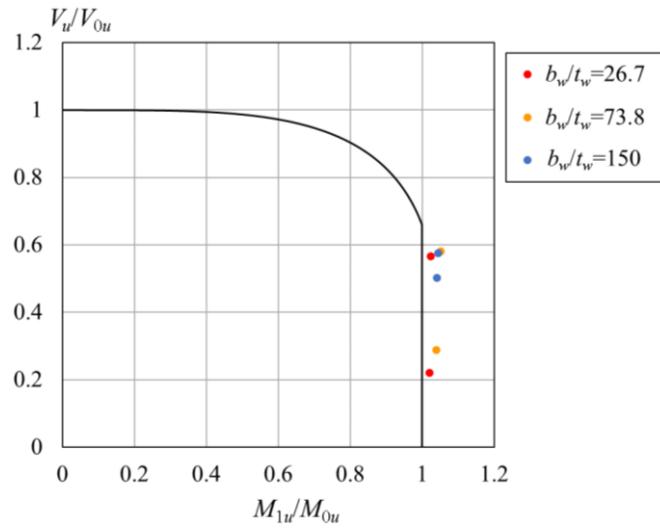
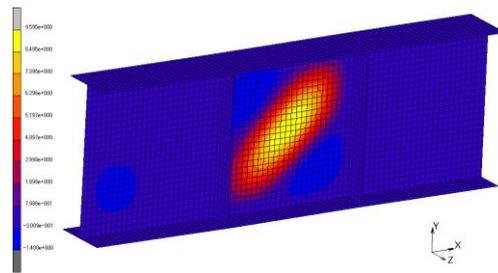
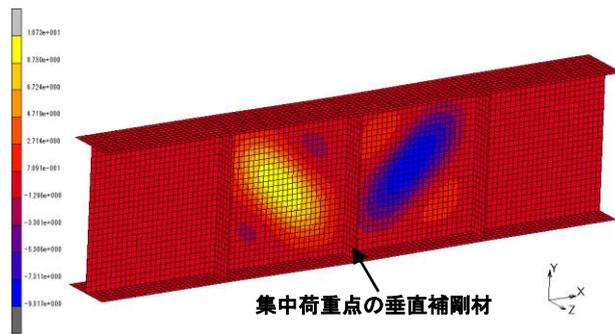


図 5.3  $a_L/b_w$  が 3 より大きい桁の集中荷重載荷に対する耐荷力相関関係



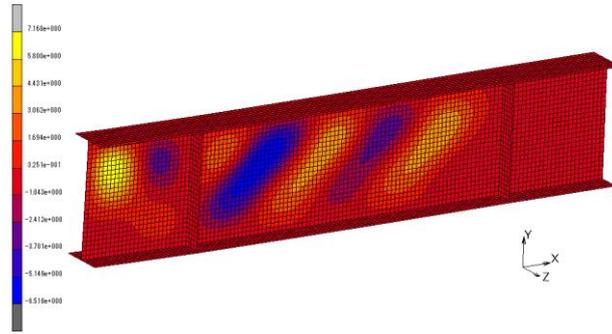
$\eta=0$  の不等曲げ載荷



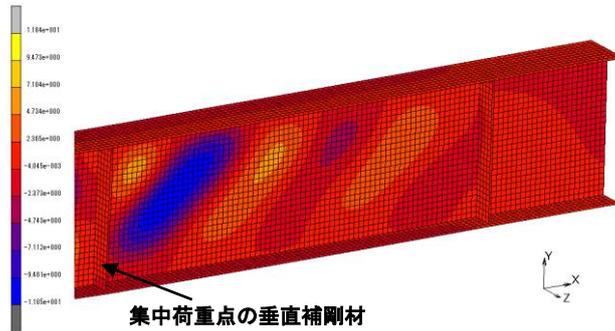
集中荷重点の垂直補剛材

集中荷重載荷

(a)  $a_L/b_w = 1$



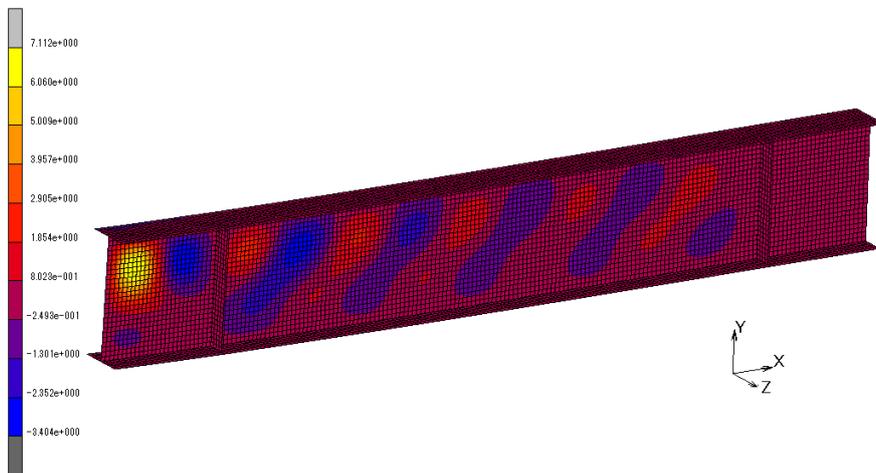
$\eta=0$  の不等曲げ載荷



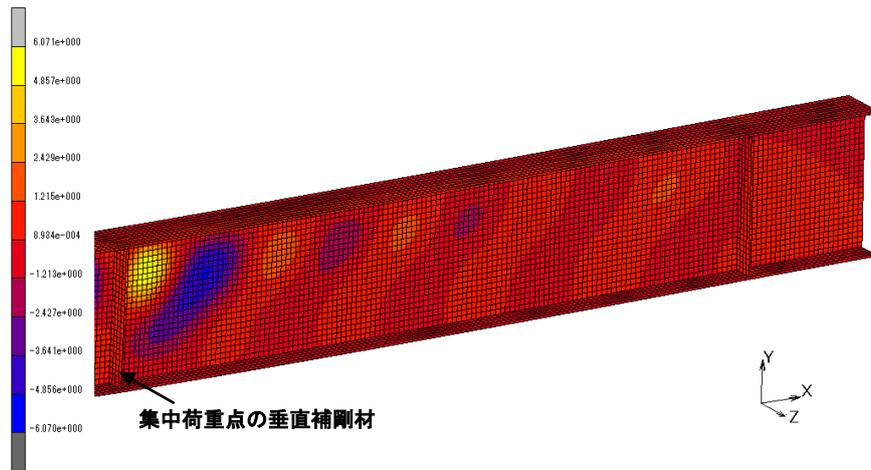
集中荷重点の垂直補剛材

集中荷重載荷

(b)  $a_L/b_w=3$



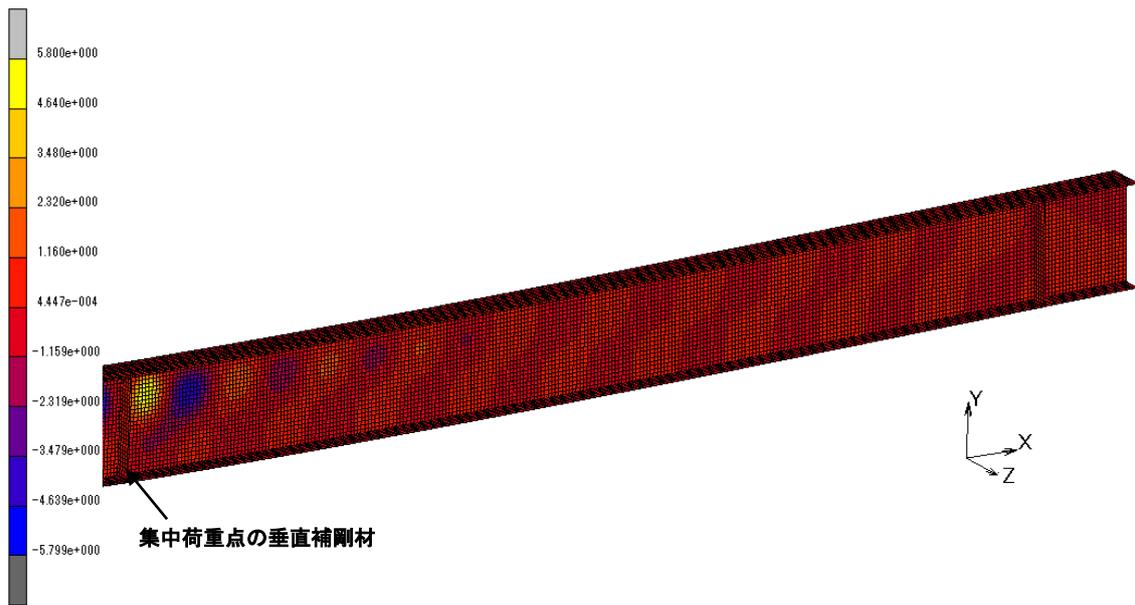
$\eta=0$  の不等曲げ載荷



集中荷重載荷  
(c)  $a_L/b_w=5$



$\eta=0$  の不等曲げ載荷



集中荷重載荷

(d)  $a_L/b_w=10$

図 5.4 ウェブの面外変形の比較 [ $b_w/t_w=73.8$ ]

## 第 6 章 結論

本研究では、有限要素法による弾塑性有限変位解析によって、曲げとせん断の組合わせ荷重を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力を明らかにした。本研究で得られた主な結論は次の通りである。

- (1) 単純支持された桁の張出し端に不等曲げを作用させることによって、支点間の桁に曲げとせん断の組合わせ荷重を生じさせる解析モデルによって、次の曲げとせん断の耐荷力相関式が与えられた。

$$0.8103 \left( \frac{M_{1u}}{M_{0u}} \right)^4 + \left( \frac{V_u}{V_{0u}} \right)^4 = 1 \quad \left( 0.66 \leq \frac{V_u}{V_{0u}} \leq 1 \right) \quad (6.1a)$$

$$\frac{M_{1u}}{M_{0u}} = 1 \quad \left( 0 \leq \frac{V_u}{V_{0u}} \leq 0.66 \right) \quad (6.1b)$$

ここに、 $M_{1u}$  と  $V_u$  : それぞれ、終局状態における桁端モーメントとせん断力  
 $M_{0u}$  と  $V_{0u}$  : それぞれ、等曲げ載荷に対する耐荷力と純せん断載荷に対する耐荷力

- (2) 式(6.1)から、次の耐荷力とモーメント比式が与えられた。

$-1 \leq \eta \leq e$  の場合、

$$\frac{M_{1u}}{M_{0u}} = \frac{1}{\left\{ 0.8103 + \left( \frac{1-\eta}{a_L/b_w} \frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}} \right)^4 \right\}^{0.25}} \quad (6.2a)$$

$$\frac{V_u}{V_{0u}} = \frac{\frac{1-\eta}{a_L/b_w} \frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}}}{\left\{ 0.8103 + \left( \frac{1-\eta}{a_L/b_w} \frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}} \right)^4 \right\}^{0.25}} \quad (6.2b)$$

$e \leq \eta \leq 1$  の場合、

$$\frac{M_{1u}}{M_{0u}} = 1 \quad (6.2c)$$

$$\frac{V_u}{V_{0u}} = \frac{1-\eta}{a_L/b_w} \frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}} \quad (6.2d)$$

$$\text{ここに, } e = 1 - 0.66 \frac{a_L b_w V_{0u}}{b_w M_{0u}} \quad (6.2e)$$

$\eta$  : モーメント比 [=  $M_{2u}/M_{1u}$  ( $M_{1u} \geq M_{2u}$ )]

$M_{2u}$  : 終局状態における桁端モーメント

$a_L$  : 桁の支間長

$b_w$  : 桁のウェブ高さ

$e$  が -1 未満の場合,  $M_{1u}/M_{0u}-\eta$  関係および  $V_u/V_{0u}-\eta$  関係は, それぞれ式(6.2c)と(6.2d)で与えられる.

- (3) アルミニウム合金材の相違, ならびにウェブの幅厚比, ウェブとフランジの断面積比, 上下フランジと支点上補剛材とで囲まれたウェブの縦横比, 中間垂直補剛材を有する桁の場合には, 上下フランジと隣接する中間垂直補剛材とで囲まれたウェブの縦横比などの因子は, 等曲げ載荷に対する耐荷力および純せん断載荷に対する耐荷力で考慮され, 曲げとせん断の組合わせ荷重に対する桁の耐荷力相関関係を与える式(6.1)および耐荷力とモーメント比の関係を与える式(6.2)は, これらの因子によって変動しない.
- (4) 不等曲げ載荷と集中荷重載荷による耐荷力を比較することにより, 式(6.1)と(6.2)の妥当性が調べられた. せん断で桁が崩壊する場合には, 不等曲げ載荷と集中荷重載荷による耐荷力は同じである. 不等曲げ載荷で  $M_{1u}/M_{0u} = 1$  になる領域においては, 集中荷重載荷の  $M_{1u}/M_{0u}$  は等曲げ載荷のそれより最大で 5%程度大きくなる. この増加率は, ウェブの幅厚比の値によって異なり, 桁が全塑性モーメントを形成する幅厚比の値に近づくとき小さくなる. 以上より, 式(6.1)と(6.2)は, 桁がせん断崩壊する場合には, 集中荷重載荷の耐荷力に対して良い推定値を与え, 曲げ崩壊する場合には, 集中荷重載荷の曲げ耐荷力に対して, 式(6.1)と(6.2)は, ウェブの幅厚比に依存して, 最大で 5%程度低めの値を推定する.

## 参考文献

- 1) 鋼構造委員会：21 世紀の建築材料 アルミニウム合金の可能性，土木学会，平成 22 年度全国大会研究討論会，研-06 資料，2010.
- 2) 大倉一郎，長尾隆史，豊田英治：道路橋用アルミニウム床版の開発，橋梁と基礎，建設図書，第 50 巻，第 3 号，pp.26-30，2016.
- 3) 鈴木勝，玉越隆史，沢田道彦：緊急仮設橋の開発について，橋梁と基礎，第 49 巻，第 11 号，pp.46-51，2015.
- 4) 西森文子，大倉一郎：座屈強度と終局強度を考慮した突起付きアルミニウム合金板の断面形状，構造工学論文集，Vol.59A，pp.199-207，2013.
- 5) 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.
- 6) 鳥畑一博，大倉一郎：曲げを受けるアルミニウム合金桁の耐荷力，ALST 研究レポート，No.42，2016.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 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) エムエスシーソフトウェア株式会社：Marc Mentat，2014.
- 12) 大倉一郎，長尾隆史，石川敏之，萩澤亘保，大隅心平：構造物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.
- 13) 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.
- 14) JIS H 4100：アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材，2015.
- 15) 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.
- 16) 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.

## 付録 A FEM 解析の数値データ [A6061-T6 桁]

本研究では、網掛けが施された数値（低い方の値）を採用している。ただし、A6061-T6 の  $b_w/t_w=150$  と A5083-O の  $b_w/t_w=188$  においては、FEM 解析の収束計算過程で安定した挙動を示さなかった場合がある。この場合には、収束計算過程で安定した挙動を示した初期たわみモードに対する結果を採用している。

表 A.1  $b_w/t_w=26.7$ ,  $a_L/b_w=1$

(a)  $A_w/A_f=1$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.314	-0.265	1.158	0.309	-0.267	1.153
0.485	-0.093	1.156	0.467	-0.108	1.152
0.730	0.164	1.134	0.716	0.150	1.132
0.780	0.220	1.121	0.772	0.213	1.120
0.839	0.290	1.099	0.836	0.287	1.098
0.916	0.385	1.062	0.915	0.384	1.062
0.994	0.485	1.019	0.994	0.485	1.019
1.037	0.544	0.987	1.037	0.544	0.987
1.082	0.613	0.938	1.082	0.613	0.937
1.099	0.647	0.904	1.100	0.649	0.904
1.146	0.724	0.844	1.146	0.724	0.844
1.145	0.932	0.428	1.145	0.933	0.426

(b)  $A_w/A_f=2$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.499	-0.439	1.066	0.492	-0.443	1.062
0.785	-0.150	1.062	0.750	-0.183	1.059
0.875	-0.050	1.050	0.864	-0.060	1.049
0.915	0.000	1.039	0.912	-0.002	1.039

0.959	0.054	1.027	0.958	0.054	1.027
1.002	0.113	1.010	1.002	0.113	1.010
1.043	0.177	0.984	1.043	0.177	0.983
1.077	0.244	0.946	1.077	0.244	0.946
1.111	0.322	0.897	1.111	0.322	0.896
1.150	0.417	0.833	1.151	0.418	0.832
1.190	0.498	0.786	1.190	0.498	0.786
1.190	1.145	0.051	1.190	1.145	0.051

(c)  $A_w/A_f=3$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.646	-0.574	1.039	0.635	-0.582	1.036
0.829	-0.388	1.037	0.815	-0.400	1.035
0.900	-0.308	1.028	0.895	-0.311	1.028
0.951	-0.241	1.015	0.952	-0.240	1.015
0.999	-0.167	0.994	0.999	-0.167	0.993
1.042	-0.089	0.963	1.043	-0.088	0.963
1.084	-0.002	0.925	1.084	-0.002	0.925
1.122	0.089	0.880	1.122	0.089	0.879
1.160	0.191	0.826	1.160	0.191	0.825
1.200	0.306	0.761	1.200	0.306	0.761
1.227	0.377	0.724	1.227	0.377	0.724
1.227	1.174	0.045	1.227	1.174	0.045

(d)  $A_w/A_f=4$ 

純せん断载荷に対する初期た わみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.763	-0.684	1.025	0.758	-0.688	1.024
0.832	-0.615	1.025	0.833	-0.612	1.024
0.897	-0.522	1.005	0.897	-0.521	1.005

0.959	-0.428	0.982	0.959	-0.427	0.982
1.015	-0.332	0.954	1.015	-0.332	0.954
1.067	-0.232	0.920	1.067	-0.232	0.920
1.114	-0.125	0.878	1.114	-0.125	0.878
1.155	-0.019	0.831	1.155	-0.019	0.831
1.194	0.096	0.778	1.194	0.096	0.778
1.235	0.223	0.717	1.235	0.224	0.716
1.257	0.291	0.684	1.257	0.291	0.684
1.257	1.063	0.138	1.257	1.063	0.138

表 A.2  $b_w/t_w=26.7$ ,  $a_L/b_w=3$

(a)  $A_w/A_f=1$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.810	-0.783	1.063	0.802	-0.783	1.058
1.007	-0.580	1.059	0.984	-0.599	1.056
1.048	-0.533	1.055	1.037	-0.541	1.053
1.079	-0.474	1.036	1.079	-0.473	1.035
1.098	-0.417	1.011	1.098	-0.416	1.011
1.120	-0.339	0.973	1.120	-0.338	0.973
1.138	-0.255	0.929	1.138	-0.255	0.929
1.146	0.058	0.725	1.146	0.059	0.725
1.145	1.046	0.066	1.145	1.046	0.066

(b)  $A_w/A_f=2$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.152	-1.133	0.865	1.152	-1.133	0.865
1.166	-1.030	0.832	1.166	-1.032	0.832
1.185	-0.909	0.793	1.185	-0.909	0.793
1.190	-0.076	0.479	1.190	-0.076	0.479

1.190	0.700	0.185	1.190	0.700	0.186
-------	-------	-------	-------	-------	-------

(c)  $A_w/A_f=3$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.227	-1.226	0.696	1.227	-1.226	0.696
1.227	-1.071	0.652	1.227	-1.073	0.653
1.227	-0.131	0.385	1.227	-0.131	0.385
1.227	0.712	0.146	1.227	0.711	0.146

(d)  $A_w/A_f=4$

純せん断载荷に対する初期た わみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.257	-1.257	0.594	1.257	-1.257	0.594
1.257	-1.115	0.560	1.257	-1.115	0.560
1.257	-0.162	0.335	1.257	-0.162	0.335
1.257	1.136	0.029	1.257	1.137	0.028

表 A.3  $b_w/t_w=26.7$ ,  $a_L/b_w=5$

(a)  $A_w/A_f=1$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.141	-1.128	0.908	1.141	-1.128	0.908
1.146	-0.759	0.762	1.146	-0.758	0.762
1.145	-0.181	0.531	1.145	-0.181	0.531
1.145	0.242	0.362	1.145	0.242	0.362
1.145	0.959	0.075	1.145	0.960	0.074

(b)  $A_w/A_f=2$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.190	-1.190	0.541	1.190	-1.190	0.541
1.190	-1.037	0.506	1.190	-1.038	0.506
1.190	-0.265	0.330	1.190	-0.265	0.330
1.190	0.468	0.164	1.190	0.468	0.164

(c)  $A_w/A_f=3$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.227	-1.227	0.418	1.227	-1.226	0.418
1.227	-1.083	0.393	1.227	-1.082	0.393
1.227	-0.301	0.260	1.227	-0.301	0.260
1.227	0.481	0.127	1.227	0.482	0.127

(d)  $A_w/A_f=4$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.257	-1.257	0.356	1.257	-1.257	0.356
1.257	-0.994	0.319	1.257	-0.995	0.319
1.257	-0.324	0.224	1.257	-0.324	0.224
1.257	1.067	0.027	1.257	1.070	0.027

表 A.4  $b_w/t_w=73.8$ ,  $a_L/b_w=1$ (a)  $A_w/A_f=1$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.233	-0.229	0.927	0.235	-0.231	0.936

0.343	-0.119	0.926	0.348	-0.118	0.935
0.461	0.000	0.924	0.464	0.000	0.931
0.476	0.016	0.924	0.485	0.022	0.931
0.554	0.095	0.920	0.567	0.105	0.926
0.638	0.183	0.915	0.657	0.200	0.919
0.732	0.281	0.906	0.757	0.304	0.909
0.834	0.389	0.892	0.866	0.421	0.894
0.943	0.509	0.871	0.968	0.535	0.869
0.991	0.565	0.856	1.007	0.583	0.850
1.061	0.649	0.827	1.061	0.654	0.818
1.062	0.759	0.607	1.062	0.762	0.602
1.062	0.935	0.256	1.062	0.936	0.253

(b)  $A_w/A_f=2$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.396	-0.391	0.897	0.402	-0.396	0.909
0.519	-0.269	0.898	0.529	-0.268	0.908
0.667	-0.117	0.894	0.682	-0.110	0.902
0.752	-0.028	0.890	0.769	-0.017	0.896
0.844	0.070	0.882	0.863	0.085	0.887
0.938	0.175	0.870	0.955	0.191	0.871
1.021	0.277	0.849	1.030	0.289	0.845
1.057	0.326	0.834	1.057	0.332	0.827
1.058	0.440	0.704	1.058	0.446	0.698
1.058	0.863	0.223	1.058	0.864	0.222

(c)  $A_w/A_f=3$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.516	-0.510	0.878	0.523	-0.514	0.887

0.649	-0.378	0.878	0.662	-0.375	0.886
0.725	-0.299	0.876	0.741	-0.293	0.884
0.808	-0.212	0.873	0.825	-0.204	0.879
0.894	-0.119	0.866	0.908	-0.110	0.871
0.974	-0.026	0.854	0.983	-0.018	0.856
0.995	0.000	0.851	0.998	0.000	0.853
1.042	0.064	0.836	1.045	0.072	0.833
1.047	0.244	0.687	1.047	0.249	0.683
1.048	0.808	0.206	1.048	0.810	0.203

(d)  $A_w/A_f=4$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.607	-0.600	0.861	0.613	-0.603	0.868
0.745	-0.462	0.861	0.757	-0.458	0.867
0.822	-0.381	0.858	0.836	-0.375	0.864
0.901	-0.295	0.853	0.912	-0.289	0.857
0.972	-0.209	0.843	0.980	-0.204	0.844
1.033	-0.128	0.828	1.035	-0.123	0.826
1.037	-0.049	0.775	1.037	-0.040	0.768
1.038	0.184	0.609	1.038	0.188	0.606
1.039	0.770	0.192	1.039	0.772	0.190

表 A.5  $b_w/t_w=73.8$ ,  $a_L/b_w=3$ (a)  $A_w/A_f=1$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.574	-0.571	0.766	0.600	-0.596	0.800
0.693	-0.451	0.765	0.723	-0.472	0.800
0.795	-0.344	0.762	0.830	-0.362	0.797
0.924	-0.206	0.756	0.962	-0.219	0.790

0.995	-0.126	0.750	1.030	-0.139	0.782
1.062	-0.044	0.740	1.061	-0.061	0.751
1.062	0.000	0.710	1.062	0.000	0.710
1.062	0.047	0.679	1.062	0.049	0.678
1.062	0.669	0.263	1.062	0.673	0.261

(b)  $A_w/A_f=2$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.936	-0.931	0.709	0.998	-0.992	0.756
1.009	-0.855	0.708	1.049	-0.941	0.757
1.058	-0.764	0.692	1.058	-0.776	0.697
1.058	-0.547	0.610	1.058	-0.550	0.611
1.058	-0.075	0.431	1.058	-0.074	0.430
1.058	0.302	0.288	1.058	0.304	0.287

(c)  $A_w/A_f=3$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.047	-1.047	0.597	1.047	-1.046	0.597
1.048	-0.565	0.460	1.047	-0.565	0.460
1.048	-0.116	0.332	1.048	-0.115	0.332
1.048	0.000	0.299	1.048	0.000	0.299
1.048	0.250	0.228	1.048	0.251	0.227

(d)  $A_w/A_f=4$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.038	-1.039	0.494	1.038	-1.038	0.494
1.039	-0.466	0.358	1.039	-0.468	0.358

1.039	-0.136	0.279	1.039	-0.136	0.279
1.039	0.480	0.133	1.039	0.484	0.132

表 A.6  $b_w/t_w=73.8$ ,  $a_L/b_w=5$

(a)  $A_w/A_f=1$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.918	-0.914	0.735	0.975	-0.968	0.780
0.985	-0.846	0.735	1.024	-0.913	0.777
1.018	-0.811	0.734	1.047	-0.880	0.774
1.062	-0.724	0.717	1.062	-0.733	0.720
1.062	-0.174	0.496	1.062	-0.173	0.496
1.062	0.000	0.426	1.062	0.000	0.426
1.062	0.500	0.226	1.062	0.502	0.225

(b)  $A_w/A_f=2$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.058	-1.058	0.482	1.058	-1.058	0.482
1.058	-0.658	0.391	1.058	-0.659	0.392
1.058	-0.237	0.295	1.058	-0.238	0.295
1.058	0.134	0.211	1.058	0.136	0.210

(c)  $A_w/A_f=3$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.048	-1.047	0.358	1.048	-1.047	0.358
1.048	-0.657	0.292	1.048	-0.658	0.292
1.048	-0.257	0.223	1.048	-0.257	0.223
1.048	0.000	0.179	1.048	0.000	0.179

1.048	0.100	0.162	1.048	0.101	0.162
-------	-------	-------	-------	-------	-------

(d)  $A_w/A_f=4$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.039	-1.039	0.296	1.039	-1.039	0.296
1.039	-0.739	0.254	1.039	-0.741	0.254
1.039	-0.266	0.186	1.039	-0.266	0.186
1.039	0.353	0.098	1.039	0.357	0.097

表 A.7  $b_w/t_w=150, a_L/b_w=1$

(a)  $A_w/A_f=1$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.182	-0.169	0.707	0.181	-0.169	0.706
0.440	0.091	0.703	0.433	0.085	0.701
0.539	0.193	0.698	0.532	0.187	0.697
0.692	0.352	0.684	0.694	0.355	0.685
0.755	0.420	0.676	0.761	0.426	0.677
0.812	0.482	0.665	0.823	0.493	0.665
0.860	0.538	0.650	0.871	0.549	0.649
0.895	0.582	0.631	0.900	0.589	0.629
0.928	0.628	0.605	0.924	0.626	0.603
0.950	0.670	0.566	0.947	0.667	0.565
0.972	0.707	0.536	0.972	0.707	0.535
0.973	0.845	0.257	0.973	0.847	0.254

(b)  $A_w/A_f=2$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.288	-0.276	0.648	0.286	-0.273	0.643
0.465	-0.099	0.648	0.467	-0.095	0.645
0.568	0.005	0.647	0.568	0.007	0.644
0.669	0.109	0.644	0.668	0.109	0.643
0.746	0.190	0.639	0.759	0.204	0.639
0.810	0.261	0.632	0.824	0.276	0.630
0.870	0.329	0.621	0.869	0.331	0.618
0.900	0.373	0.606	0.894	0.370	0.602
0.922	0.414	0.584	0.921	0.415	0.582
0.924	0.449	0.546	0.924	0.449	0.546
0.923	0.733	0.218	0.923	0.735	0.215

(c)  $A_w/A_f=3$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.373	-0.356	0.625	0.368	-0.354	0.618
0.552	-0.177	0.625	0.524	-0.199	0.619
0.649	-0.079	0.623	0.629	-0.095	0.620
0.728	0.004	0.620	0.728	0.007	0.618
0.789	0.072	0.614	0.795	0.080	0.612
0.869	0.160	0.607	0.838	0.135	0.603
0.876	0.204	0.575	0.874	0.204	0.573
0.875	0.324	0.472	0.875	0.324	0.472
0.877	0.657	0.188	0.876	0.656	0.188

(d)  $A_w/A_f=4$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.434	-0.414	0.609	0.428	-0.414	0.604
0.612	-0.237	0.608	0.564	-0.278	0.605
0.688	-0.157	0.607	0.666	-0.175	0.604
0.747	-0.094	0.603	0.750	-0.088	0.601
0.807	-0.026	0.598	0.795	-0.034	0.595
0.833	0.011	0.590	0.825	0.006	0.587
0.837	0.043	0.570	0.835	0.040	0.571
0.837	0.107	0.524	0.837	0.105	0.525
0.838	0.259	0.415	0.837	0.260	0.414
0.838	0.600	0.170	0.837	0.603	0.168

表 A.8  $b_w/t_w=150$ ,  $a_l/b_w=3$ (a)  $A_w/A_f=1$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.337	-0.335	0.452	0.332	-0.329	0.444
0.405	-0.267	0.452	0.401	-0.261	0.445
0.489	-0.181	0.451	0.483	-0.177	0.443
0.594	-0.072	0.448	0.597	-0.060	0.442
0.728	0.071	0.442	0.738	0.089	0.436
0.888	0.249	0.430	0.909	0.279	0.424
0.927	0.295	0.425	0.937	0.316	0.418
0.973	0.352	0.418	0.973	0.366	0.408
0.973	0.389	0.393	0.973	0.398	0.387
0.973	0.608	0.246	0.973	0.598	0.252

(b)  $A_w/A_f=2$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.560	-0.556	0.428	0.553	-0.549	0.422
0.640	-0.476	0.428	0.633	-0.468	0.422
0.737	-0.374	0.426	0.731	-0.366	0.420
0.855	-0.246	0.422	0.852	-0.235	0.417
0.918	-0.174	0.418	0.924	-0.154	0.413
0.923	0.021	0.346	0.920	0.021	0.345
0.924	0.288	0.244	0.924	0.270	0.250

(c)  $A_w/A_f=3$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.726	-0.720	0.413	0.718	-0.713	0.409
0.812	-0.633	0.412	0.806	-0.625	0.408
0.877	-0.539	0.404	0.879	-0.536	0.404
0.877	-0.383	0.360	0.877	-0.380	0.359
0.876	-0.048	0.264	0.876	-0.070	0.270
0.876	0.220	0.187	0.877	0.210	0.190

(d)  $A_w/A_f=4$ 

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.837	-0.839	0.401	0.836	-0.830	0.398
0.839	-0.556	0.334	0.839	-0.552	0.333
0.838	-0.076	0.219	0.838	-0.095	0.223
0.837	0.376	0.110	0.838	0.372	0.111

表 A.9  $b_w/t_w=150$ ,  $a_L/b_w=5$

(a)  $A_w/A_f=1$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.507	-0.505	0.409	0.501	-0.499	0.404
0.564	-0.447	0.408	0.560	-0.439	0.403
0.633	-0.373	0.406	0.633	-0.365	0.403
0.722	-0.277	0.403	0.725	-0.271	0.402
0.836	-0.152	0.399	0.848	-0.152	0.404
0.905	-0.075	0.395	0.912	-0.067	0.395
0.973	0.006	0.390	0.973	0.014	0.387
0.973	0.142	0.335	0.972	0.103	0.351
0.973	0.443	0.214	0.973	0.434	0.217

(b)  $A_w/A_f=2$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.815	-0.811	0.374	0.816	-0.811	0.374
0.887	-0.736	0.373	0.892	-0.745	0.376
0.922	-0.699	0.373	0.923	-0.705	0.374
0.926	-0.505	0.329	0.924	-0.522	0.333
0.923	-0.169	0.251	0.925	-0.193	0.257
0.923	0.120	0.185	0.923	0.109	0.187

(c)  $A_w/A_f=3$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.877	-0.877	0.300	0.876	-0.875	0.300
0.877	-0.509	0.237	0.876	-0.525	0.240
0.876	-0.196	0.184	0.876	-0.210	0.186

0.876	0.083	0.136	0.876	0.076	0.137
-------	-------	-------	-------	-------	-------

(d)  $A_w/A_f=4$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1w}/M_Y$	$M_{2w}/M_Y$	$V_w/V_Y$	$M_{1w}/M_Y$	$M_{2w}/M_Y$	$V_w/V_Y$
0.838	-0.838	0.241	0.838	-0.837	0.240
0.838	-0.358	0.172	0.838	-0.510	0.193
0.838	-0.203	0.149	0.838	-0.212	0.151
0.838	0.067	0.111	0.838	0.061	0.111

## 付録 B FEM 解析の数値データ [A5083-O 桁]

表 B.1  $b_w/t_w=29.7$ ,  $a_L/b_w=1$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.312	-0.271	1.162	0.307	-0.275	1.159
0.500	-0.081	1.158	0.485	-0.095	1.156
0.646	0.070	1.149	0.634	0.058	1.147
0.792	0.229	1.122	0.786	0.223	1.121
0.903	0.363	1.078	0.903	0.363	1.077
0.983	0.464	1.034	0.983	0.464	1.033
1.083	0.600	0.961	1.079	0.597	0.961
1.153	0.705	0.893	1.153	0.705	0.892
1.153	0.747	0.808	1.153	0.747	0.808
1.152	1.067	0.170	1.152	1.067	0.170

表 B.2  $b_w/t_w=29.7$ ,  $a_L/b_w=3$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.812	-0.791	1.065	0.804	-0.791	1.060
0.998	-0.577	1.046	0.976	-0.616	1.058
1.069	-0.479	1.029	1.072	-0.474	1.028
1.088	-0.411	0.996	1.089	-0.409	0.995
1.131	-0.269	0.930	1.131	-0.268	0.930
1.153	-0.171	0.879	1.153	-0.170	0.879
1.153	0.092	0.705	1.153	0.092	0.704
1.153	0.536	0.410	1.153	0.536	0.410
1.152	0.855	0.198	1.152	0.854	0.198

表 B.3  $b_w/t_w=29.7$ ,  $a_L/b_w=5$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.146	-1.136	0.910	1.145	-1.135	0.909
1.153	-1.040	0.874	1.153	-1.042	0.875
1.153	-0.909	0.822	1.153	-0.908	0.822
1.153	-0.737	0.753	1.153	-0.736	0.753
1.153	-0.496	0.657	1.153	-0.495	0.657
1.153	-0.198	0.538	1.153	-0.198	0.538
1.152	0.121	0.411	1.152	0.123	0.411
1.152	0.435	0.286	1.152	0.435	0.286
1.152	0.691	0.184	1.152	0.690	0.184

表 B.4  $b_w/t_w=90.2$ ,  $a_L/b_w=1$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.240	-0.237	0.955	0.239	-0.235	0.950
0.398	-0.079	0.955	0.400	-0.074	0.949
0.580	0.106	0.949	0.586	0.115	0.943
0.771	0.306	0.931	0.781	0.319	0.923
0.957	0.513	0.889	0.962	0.524	0.877
1.061	0.636	0.850	1.061	0.643	0.835
1.061	0.670	0.782	1.061	0.676	0.769
1.061	0.824	0.474	1.061	0.826	0.470

表 B.5  $b_w/t_w=90.2$ ,  $a_L/b_w=3$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.586	-0.583	0.780	0.612	-0.609	0.815
0.662	-0.506	0.780	0.693	-0.529	0.815

0.755	-0.411	0.778	0.788	-0.429	0.812
0.870	-0.291	0.774	0.902	-0.302	0.804
1.013	-0.130	0.762	1.033	-0.134	0.778
1.061	-0.072	0.756	1.061	-0.092	0.769
1.061	0.070	0.661	1.061	0.079	0.655
1.061	0.286	0.517	1.061	0.291	0.513
1.061	0.502	0.373	1.061	0.506	0.371
1.061	0.832	0.153	1.061	0.832	0.153

表 B.6  $b_w/t_w=90.2$ ,  $a_L/b_w=5$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.945	-0.941	0.755	0.985	-0.977	0.785
0.992	-0.892	0.754	1.023	-0.930	0.781
1.050	-0.828	0.752	1.060	-0.866	0.771
1.061	-0.703	0.706	1.061	-0.705	0.707
1.061	-0.478	0.616	1.061	-0.476	0.615
1.061	-0.187	0.499	1.061	-0.185	0.499
1.061	0.313	0.300	1.061	0.317	0.298
1.062	0.757	0.122	1.061	0.760	0.121

表 B.7  $b_w/t_w=188$ ,  $a_L/b_w=1$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.183	-0.174	0.717	0.179	-0.171	0.704
0.331	-0.024	0.716	0.332	-0.016	0.701
0.455	0.102	0.710	0.447	0.101	0.698
0.618	0.275	0.691	0.611	0.270	0.687
0.748	0.418	0.664	0.768	0.439	0.663
0.858	0.546	0.629	0.870	0.559	0.626
0.917	0.616	0.606	0.915	0.616	0.603

0.967	0.681	0.575	0.963	0.678	0.573
0.969	0.770	0.402	0.969	0.770	0.401

表 B. 8  $b_w/t_w=188$ ,  $a_L/b_w=3$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=6$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.335	-0.333	0.449	0.328	-0.326	0.440
0.414	-0.254	0.449	0.411	-0.244	0.439
0.509	-0.158	0.448	0.502	-0.153	0.439
0.623	-0.040	0.445	0.603	-0.053	0.440
0.754	0.101	0.439	0.741	0.087	0.439
0.906	0.277	0.422	0.898	0.258	0.430
0.97	0.355	0.413	0.97	0.338	0.424
0.970	0.503	0.313	0.969	0.483	0.326
0.969	0.824	0.098	0.969	0.823	0.098

表 B. 9  $b_w/t_w=188$ ,  $a_L/b_w=5$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=4$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=10$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.511	-0.509	0.411	0.541	-0.539	0.435
0.568	-0.451	0.411	0.628	-0.508	0.458
0.639	-0.379	0.410	0.650	-0.429	0.434
0.727	-0.286	0.408	0.718	-0.351	0.431
0.842	-0.162	0.404	0.813	-0.247	0.427
0.970	0.000	0.391	0.964	-0.079	0.420
0.970	0.126	0.340	0.969	0.085	0.356
0.969	0.307	0.267	0.969	0.291	0.273
0.969	0.775	0.078	0.969	0.774	0.079

## 付録 C FEM 解析の数値データ

### [中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁]

表 C.1  $b_w/t_w=29.7$ ,  $a_L/b_w=3$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.820	-0.789	1.069	0.814	-0.791	1.066
1.025	-0.574	1.063	1.007	-0.590	1.062
1.097	-0.435	1.018	1.096	-0.434	1.017
1.122	-0.340	0.972	1.122	-0.340	0.972
1.142	-0.250	0.925	1.142	-0.250	0.925
1.153	-0.171	0.880	1.153	-0.171	0.879
1.153	0.092	0.705	1.153	0.092	0.705
1.153	0.538	0.408	1.153	0.538	0.408
1.153	0.855	0.198	1.153	0.855	0.198

表 C.2  $b_w/t_w=29.7$ ,  $a_L/b_w=5$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.145	-1.136	0.909	1.145	-1.135	0.909
1.153	-1.041	0.874	1.153	-1.042	0.875
1.153	-0.909	0.822	1.153	-0.909	0.822
1.153	-0.737	0.753	1.153	-0.737	0.753
1.153	-0.497	0.658	1.153	-0.497	0.658
1.153	-0.198	0.538	1.153	-0.198	0.538
1.153	0.123	0.410	1.153	0.123	0.411
1.153	0.436	0.286	1.153	0.436	0.286
1.153	0.692	0.184	1.153	0.691	0.184

表 C.3  $b_w/t_w=90.2$ ,  $a_L/b_w=3$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.694	-0.686	0.921	0.690	-0.683	0.916
0.774	-0.605	0.920	0.773	-0.604	0.918
0.863	-0.504	0.912	0.861	-0.494	0.904
0.963	-0.367	0.887	0.964	-0.355	0.880
1.061	-0.197	0.839	1.061	-0.185	0.831
1.061	-0.136	0.798	1.061	-0.127	0.792
1.061	0.066	0.664	1.061	0.071	0.660
1.061	0.285	0.518	1.061	0.288	0.515
1.061	0.502	0.373	1.061	0.504	0.371
1.061	0.831	0.153	1.061	0.832	0.153

表 C.4  $b_w/t_w=90.2$ ,  $a_L/b_w=5$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
1.056	-1.046	0.841	1.054	-1.042	0.839
1.061	-0.989	0.820	1.061	-0.991	0.821
1.061	-0.873	0.774	1.061	-0.872	0.774
1.061	-0.709	0.708	1.061	-0.709	0.708
1.061	-0.480	0.617	1.061	-0.480	0.617
1.061	-0.188	0.500	1.061	-0.187	0.499
1.061	0.313	0.300	1.061	0.315	0.299
1.061	0.757	0.122	1.061	0.759	0.121

表 C.5  $b_w/t_w=188$ ,  $a_L/b_w=3$

純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.423	-0.422	0.567	0.419	-0.418	0.562
0.497	-0.342	0.564	0.486	-0.354	0.564
0.594	-0.243	0.562	0.584	-0.269	0.573
0.717	-0.117	0.560	0.690	-0.159	0.570
0.861	0.037	0.554	0.839	-0.009	0.570
0.924	0.112	0.545	0.955	0.105	0.571
0.969	0.186	0.526	0.969	0.156	0.546
0.969	0.464	0.339	0.969	0.465	0.339
0.969	0.819	0.101	0.969	0.821	0.100

表 C.6  $b_w/t_w=188$ ,  $a_L/b_w=5$

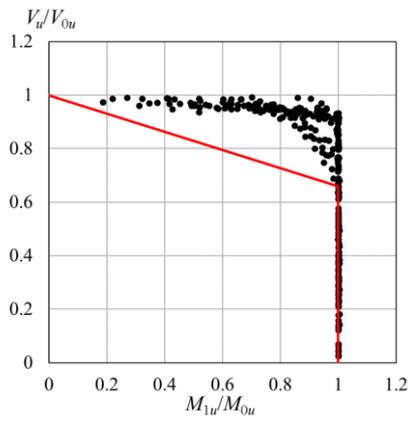
純せん断载荷に対する 初期たわみモード数 $m=1$			等曲げ载荷に対する 初期たわみモード数 $m=2$		
$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$	$M_{1u}/M_Y$	$M_{2u}/M_Y$	$V_u/V_Y$
0.692	-0.691	0.557	0.708	-0.705	0.569
0.743	-0.637	0.556	0.766	-0.656	0.573
0.809	-0.568	0.555	0.833	-0.589	0.573
0.896	-0.474	0.552	0.908	-0.501	0.568
0.969	-0.349	0.531	0.969	-0.372	0.540
0.969	-0.140	0.447	0.969	-0.140	0.447
0.969	0.060	0.366	0.969	0.061	0.366
0.969	0.277	0.279	0.969	0.278	0.278
0.969	0.774	0.079	0.969	0.773	0.079

## 付録D 曲げとせん断の耐荷力相関式

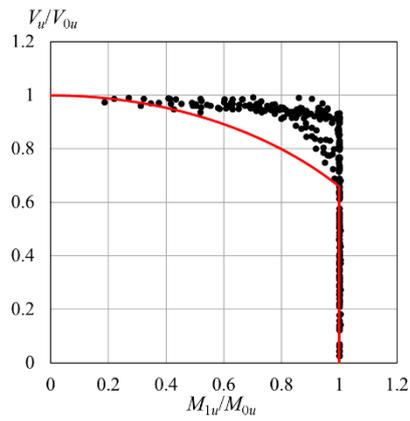
$$\left(1 - 0.66^j\right) \left(\frac{M_{1u}}{M_{0u}}\right)^i + \left(\frac{V_u}{V_{0u}}\right)^j = 1 \quad \left(0.66 \leq \frac{V_u}{V_{0u}} \leq 1\right) \quad (D.1)$$

$$\frac{M_{1u}}{M_{0u}} = 1 \quad \left(0 \leq \frac{V_u}{V_{0u}} \leq 0.66\right) \quad (D.2)$$

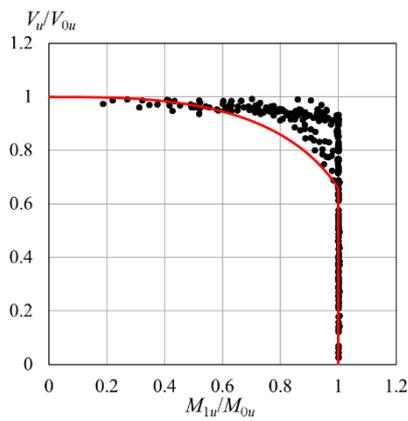
(1)  $i=j=1$



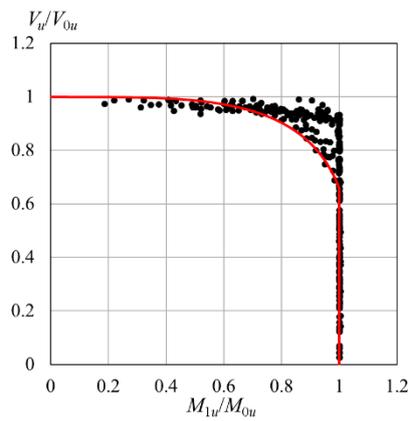
(2)  $i=j=2$



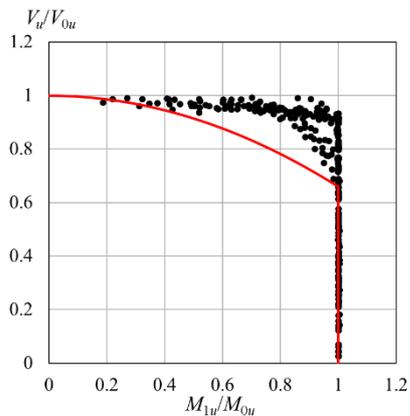
(3)  $i=j=3$



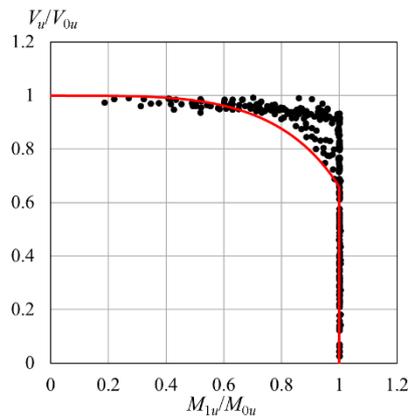
(4)  $i=j=4$



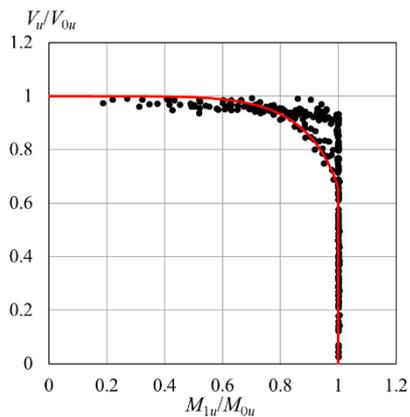
(5)  $i=2, j=1$



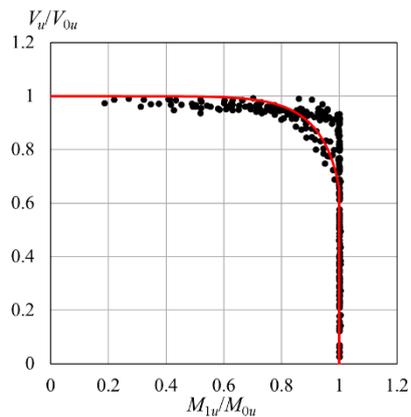
(6)  $i=4, j=2$



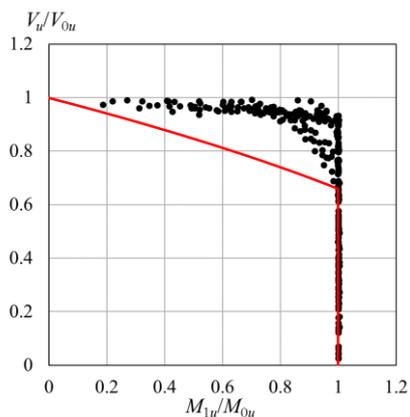
(7)  $i=6, j=3$



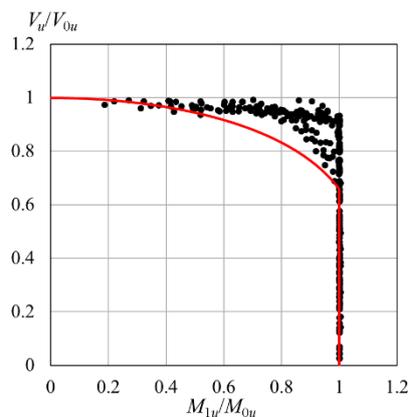
(8)  $i=8, j=4$



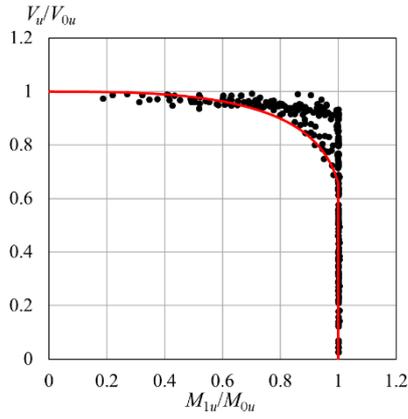
(9)  $i=1, j=2$



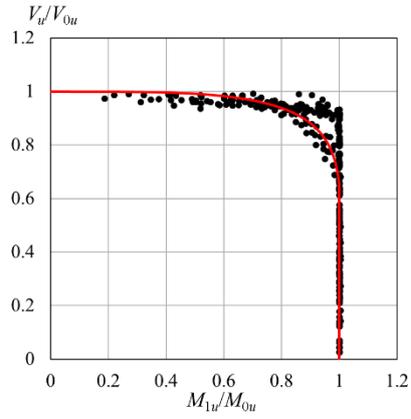
(10)  $i=2, j=4$



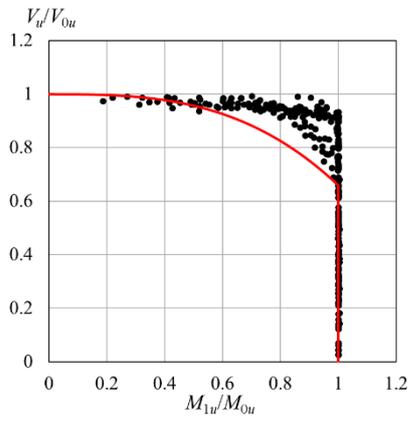
(11)  $i=3, j=6$



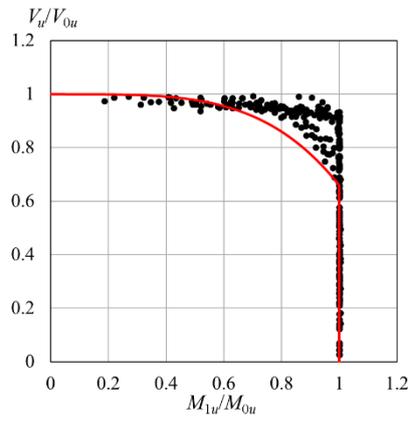
(12)  $i=4, j=8$



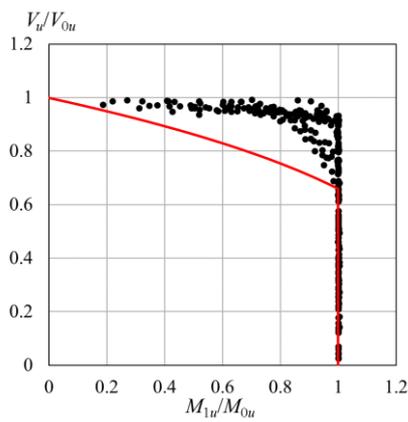
(13)  $i=3, j=1$



(14)  $i=4, j=1$



(15)  $i=1, j=3$



(16)  $i=1, j=4$

