

異種アルミニウム合金桁の耐荷力

ALST 研究レポート 58

2020年2月

大阪大学大学院工学研究科

岩倉弘幸, 大倉一郎

概要

異種アルミニウム合金桁の設計法を確立するために、ALST 研究レポート No.56 においては、中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁のせん断耐荷力が明らかにされた。本研究は、さらに、有限要素法による弾塑性有限変位解析によって次の三つの耐荷力を明らかにする。

- 1) 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力
- 2) ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力
- 3) 異種アルミニウム合金桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力

目次

第1章 序論	・・・1
第2章 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力	・・・2
2.1 曲げとせん断の組合わせ荷重を受ける A5083-O 桁の耐荷力	・・・2
2.2 解析対象	・・・5
2.3 有限要素法による弾塑性有限変位解析	・・・9
第3章 ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力	・・・13
3.1 ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁	・・・13
3.2 解析対象	・・・15
3.3 有限要素法による弾塑性有限変位解析	・・・17
第4章 異種アルミニウム合金桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力	・・・21
4.1 解析対象	・・・21
4.2 有限要素法による弾塑性有限変位解析	・・・24
第5章 結論	・・・31
参考文献	・・・32
付録A 終局時の桁ウェブの面外変形 [表 2.4]	・・・33
付録B 終局時の桁ウェブの面外変形 [表 3.5]	・・・38

第 1 章 序論

ALST 研究レポート No.56¹⁾において、図 1.1 に示すような、中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁を支承上に配置し、これにウェブが縦補剛された A6061-T6 桁が高力ボルト摩擦接合継手によって連結された異種アルミニウム合金桁が提案された。この桁によって、次に列挙する、A6061-T6 桁を支承上まで伸ばした場合に生じる諸問題を解決することができる。

- 1) 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。
- 2) MIG 溶接によって端補剛材をウェブに連結する際に、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。したがって、隅肉溶接が摩擦攪拌接合に交差する接合部分の品質を確認する必要がある。
- 3) 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である。

異種アルミニウム合金桁の設計法を確立するために、ALST 研究レポート No.56¹⁾においては、中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁のせん断耐荷力が明らかにされた。他方、A5083-O 桁の曲げ耐荷力²⁾ならびにウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の曲げ耐荷力³⁾およびせん断耐荷力⁴⁾がそれぞれ明らかにされている。

本研究は、異種アルミニウム合金桁の設計法を確立するために、さらに、有限要素法による弾塑性有限変位解析を実施することによって次の三つの耐荷力を明らかにする。

- 1) 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力
- 2) ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力
- 3) 異種アルミニウム合金桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力

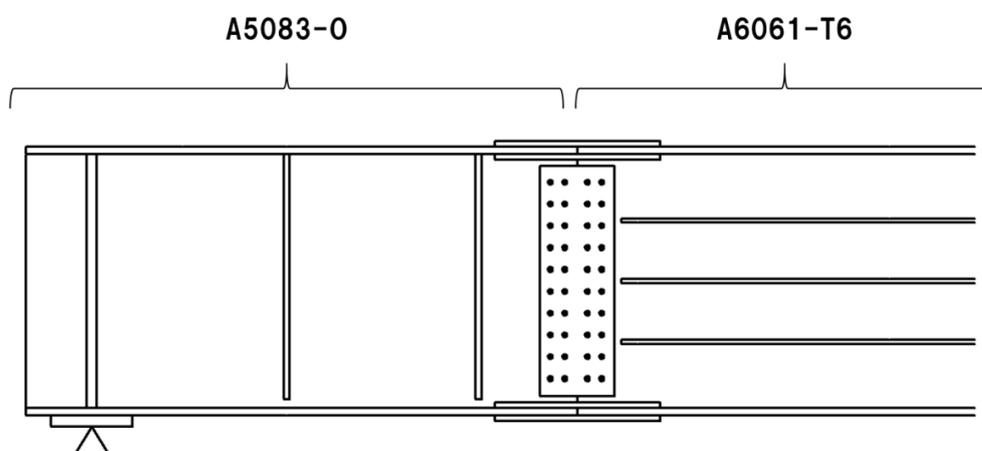


図 1.1 異種アルミニウム合金桁

第2章 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁の曲げとせん断の

組合わせ耐荷力

2.1 曲げとせん断の組合わせ荷重を受ける A5083-O 桁の耐荷力

フランジが横倒れ座屈と局部座屈を起こさない場合に対する、曲げとせん断を受けるアルミニウム合金桁の耐荷力が次式で与えられている⁵⁾。

$$0.81 \left(\frac{M_{1u}}{M_{0u}} \right)^4 + \left(\frac{V_u}{V_{0u}} \right)^4 = 1 \quad \left(0.66 \leq \frac{V_u}{V_{0u}} \leq 1 \right) \quad (2.1.a)$$

$$\left(\frac{M_{1u}}{M_{0u}} \right) = 1 \quad \left(0 \leq \frac{V_u}{V_{0u}} \leq 0.66 \right) \quad (2.1.b)$$

ここに、 M_{1u} : 桁端の終局曲げモーメント
 V_u : 桁の終局せん断力
 M_{0u} : 等曲げモーメントが作用する桁の終局曲げモーメント
 V_{0u} : 純せん断力が作用する桁の終局せん断力

図 2.1 に示すように、式(2.1)は、張出し端に不等曲げを載荷させることによって支間の間に曲げとせん断の組合わせ荷重が生じる場合に対する桁の耐荷力を与える。

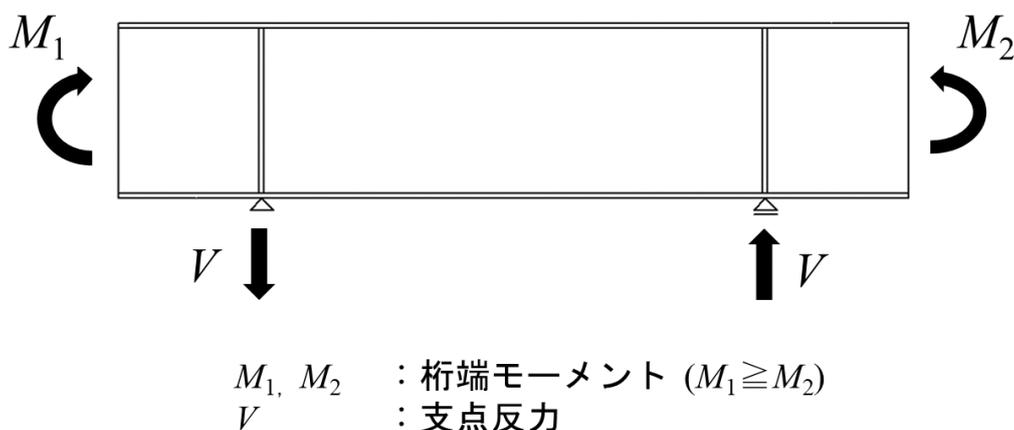


図 2.1 不等曲げ載荷

式(2.1)が与える耐荷力相関曲線を図 2.2 に示す。文献 5)では、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パネルの縦横比 a/b_w (図 2.3 参照) が 1 の A5083-O 桁に対して、式(2.1)が与える耐荷力相関曲線が安全側の評価を与えることが示されている。本研究では、 a/b_w が 1 以外の A5083-O 桁に対しても、式(2.1)が適用できるか否かを調べる。

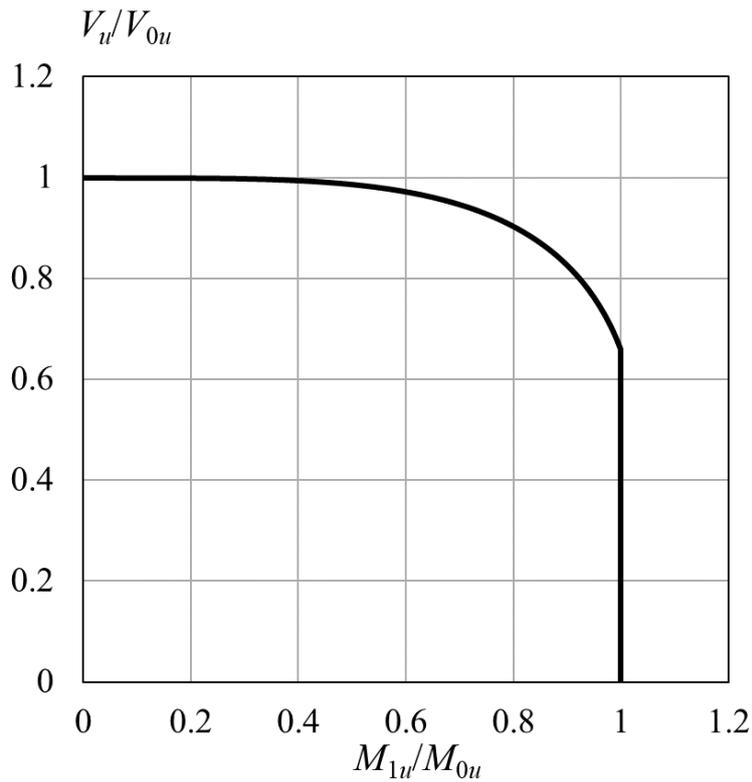


図 2.2 耐荷力相関曲線

桁の断面形状が上下対称の A5083-O 桁に対して，等曲げモーメントが作用する桁の終局曲げモーメント M_{0u} が次式で与えられている²⁾。

$$M_{0u} = g_w M_Y \quad (2.2.a)$$

$$g_w = \begin{cases} 1 + \frac{A_w}{4A_f} & \left(\frac{b_w}{t_w} \leq 30\right) \\ 1 + \frac{A_w}{6A_f} & \\ 1 - \frac{\frac{A_w}{A_f}}{720 \left(1 + \frac{A_w}{6A_f}\right)} \left(\frac{b_w}{t_w} - 90\right) & \left(30 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 114\right) \\ \frac{1 + \frac{2A_w}{15A_f} \left(114 \frac{t_w}{b_w}\right)^{0.67}}{1 + \frac{A_w}{6A_f}} & \left(114 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 220\right) \end{cases} \quad (2.2.b)$$

ここに， M_Y : 桁の降伏曲げモーメント (= $\sigma_{0.2}W$)
 W : 桁の弾性断面係数
 $\sigma_{0.2}$: アルミニウム合金 A5083-O の 0.2%耐力 (= 125MPa)

- A_w : ウェブの断面積 (図 2.3 参照)
 A_f : 上下フランジ 1 枚の断面積 (図 2.3 参照)
 b_w : ウェブの板幅 (図 2.3 参照)
 t_w : ウェブの板厚 (図 2.3 参照)

中間垂直補剛材を有する、桁の断面形状が上下対称の A5083-O 桁に対して、純せん断力が作用する桁の終局せん断力 V_{0u} が次式で与えられている¹⁾。

$$\frac{V_{0u}}{V_Y} = \begin{cases} 1 & (R \leq 0.53) \\ \frac{1.02}{R} - \frac{0.26}{R^2} & (0.53 \leq R \leq 0.92) \\ \frac{0.75}{R^{0.76}} & (0.92 \leq R \leq 3) \end{cases} \quad (2.3.a)$$

$$V_Y = \tau_{0.2} b_w t_w = \frac{\sigma_{0.2}}{\sqrt{3}} b_w t_w \quad (2.3.b)$$

$$R = \frac{1}{\pi} F \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\tau_{0.2}}{E}} \frac{b_w}{t_w} = 3.38 \times 10^{-2} \frac{F}{\sqrt{k}} \frac{b_w}{t_w} \quad \left(\frac{b_w}{t_w} \leq 220 \right) \quad (2.3.c)$$

$$k = \begin{cases} 4 + \frac{5.34}{\left(\frac{a}{b_w}\right)^2} & \left(0.5 \leq \frac{a}{b_w} \leq 1\right) \\ 5.34 + \frac{4}{\left(\frac{a}{b_w}\right)^2} & \left(1 < \frac{a}{b_w} \leq 2\right) \end{cases} \quad (2.3.d)$$

$$F = \begin{cases} \left(0.022 \frac{A_w}{A_f} - 0.167\right) \frac{a}{b_w} + 0.015 \frac{A_w}{A_f} + 0.875 & \left(0.5 \leq \frac{a}{b_w} \leq 1\right) \\ \left(0.02 \frac{A_w}{A_f} - 0.009\right) \frac{a}{b_w} + 0.017 \frac{A_w}{A_f} + 0.717 & \left(1 < \frac{a}{b_w} \leq 2\right) \end{cases} \quad (2.3.e)$$

- ここに、 V_Y : ウェブ断面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)
 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 (図 2.3 参照)

2.2 解析対象

図 2.3 に示すように，両端単純支持された桁の中央に集中荷重を載荷させることによって，曲げとせん断の組合わせ荷重を桁に生じさせる．解析対象の桁の断面寸法ならびに端補剛材と中間垂直補剛材の断面寸法を表 2.1 に示す．これらの断面寸法は ALST 研究レポート No.56 の解析対象と同じである．桁の断面形状は上下対称である．

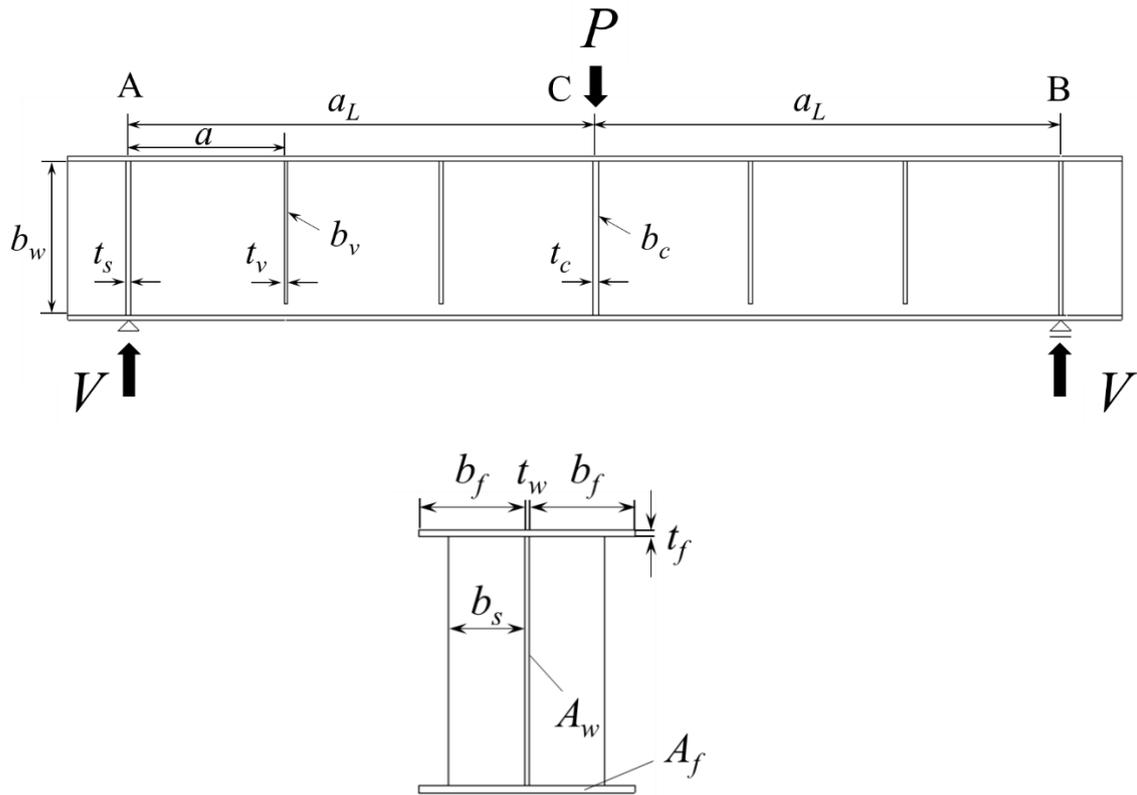


図 2.3 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁

表 2.1 桁の断面寸法ならびに端補剛材と中間垂直補剛材の断面寸法

b_w/t_w	b_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	b_s (mm)	t_s (mm)	b_c (mm)	t_c (mm)	a/b_w	b_v (mm)	t_v (mm)
90	800.0	8.9	142.1	24.2	89.0	15.2	137.4	23.4	0.5	73.1	12.5
									1	51.7	8.8
									1.5	42.2	7.2
									2	36.6	6.2
220	800.0	3.6	91.5	15.6	70.4	12.0	109.2	18.6	0.5	37.5	6.4
									1	26.5	4.5
									1.5	21.6	3.7
									2	18.7	3.2

表 2.1 の記号の説明を次に示す.

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	: 端補剛材の片側の板幅
t_s	: 端補剛材の板厚
b_c	: 集中荷重直下の垂直補剛材の片側の板幅
t_c	: 集中荷重直下の垂直補剛材の板厚
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

ウェブの幅厚比 b_w/t_w に対して 90 と 220 を考慮する. 式(2.2.b)から分かるように,
 $b_w/t_w = 90$ は, 桁が降伏モーメントに達するときの幅厚比であり, $b_w/t_w = 220$ は, A5083-O
 桁の曲げ耐荷力推定式においてウェブ幅厚比の適用限界値である²⁾. ウェブとフランジの断
 面積比 A_w/A_f に対して 1 を考慮する.

桁中央の集中荷重直下の垂直補剛材の断面寸法 b_c と t_c は, 図 2.4 に示す関係から, ALST
 研究レポート No.56 の式(2.3)の V_Y を $2V_Y$ に置換え, 同研究レポートの 2.2 節に従って算出さ
 れた寸法である.

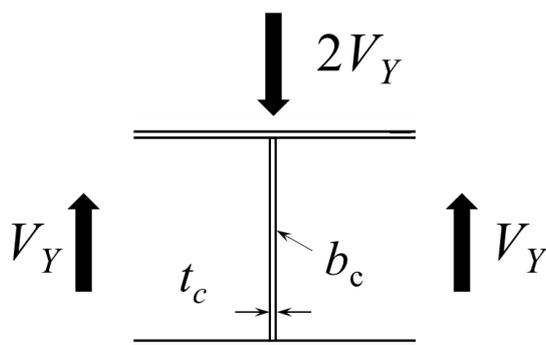


図 2.4 集中荷重直下の垂直補剛材

図 2.3 を参照して, 桁の支間中央に生じる曲げモーメント M_c と支点反力 V の関係は次の
 通りである.

$$M_c = a_L V \tag{2.4}$$

ここに, a_L : 支点と支間中央の間の距離

式(2.4)は次のように無次元化される.

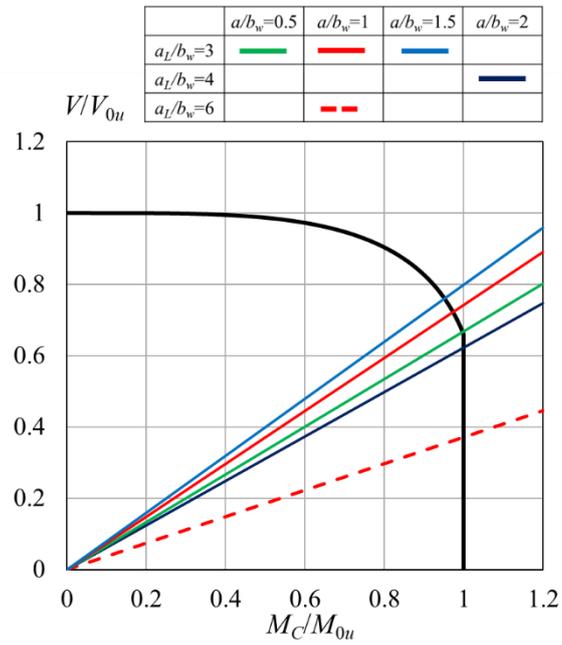
$$\frac{V}{V_{0u}} = \frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}} \frac{b_w}{a_L} \frac{M_c}{M_{0u}} \quad (2.5)$$

a_L/b_w に対して表 2.2 に示す値を持つ桁を解析対象とする.

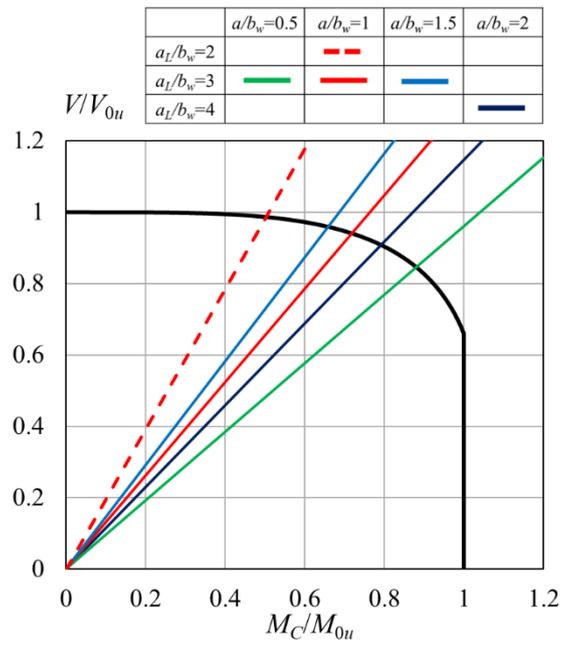
表 2.2 解析対象の桁とその特性値

b_w/t_w	a/b_w	M_{0u} (N · mm)	V_{0u} (N)	$\frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}}$	a_L/b_w	$\frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}} \frac{b_w}{a_L}$
90	0.5	821973702	512134	2.006	3	0.669
	1		462002	2.224	3	0.741
					6	0.371
	1.5		428282	2.399	3	0.800
2	411984	2.494	4	0.623		
220	0.5	314373397	136708	2.875	3	0.958
	1		100369	3.915	2	1.958
					3	1.305
	1.5		90019	4.365	3	1.455
2	85669	4.587	4	1.147		

解析対象の桁に対して, 式(2.5)が与える関係を図 2.5 に示す. 同図には, 式(2.1)が与える耐荷力相関曲線も描いてある.



(a) $b_w/t_w = 90$



(b) $b_w/t_w = 220$

図 2.5 V/V_{0u} と M_c/M_{0u} の関係

2.3 有限要素法による弾塑性有限変位解析

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⁶⁾。

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n & (\sigma \leq \sigma_{0.2}) \\ \sigma = \sigma_{0.2} & (\sigma > \sigma_{0.2}) \end{cases} \quad (2.6)$$

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, 日本産業規格で規定される 0.2%耐力であり⁷⁾, 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る非超過確率 5%に対する値である⁶⁾。

解析対象の境界条件を表 2.3, 同表の参照図を図 2.6 に示す。 支点上の辺 AC の x , y , z 軸方向の変位および辺 DF 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 BE 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。

表 2.3 境界条件

	変位		
	x 軸方向	y 軸方向	z 軸方向
辺 IJ	0	強制変位 d_u	1
辺 BE, 辺 GH	0	0	1
辺 AC	1	1	1
辺 DF	0	1	1

注: 0 と 1 は, それぞれ自由と拘束を表す。

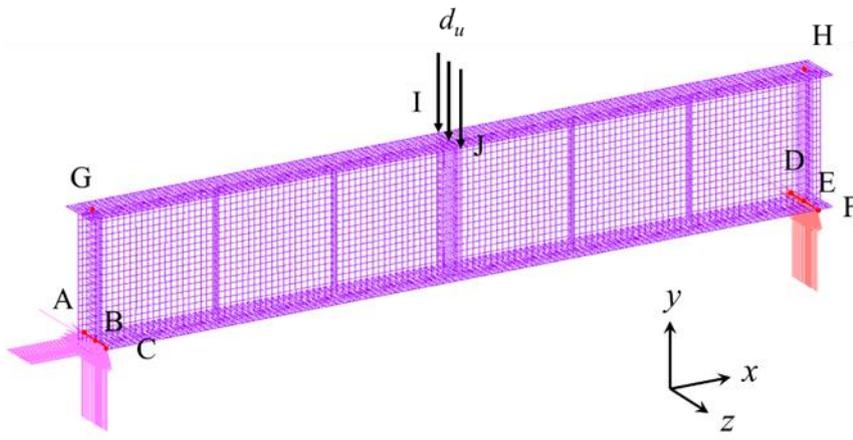


図 2.6 表 2.3 の参照図

汎用有限要素法解析プログラム MARC⁸⁾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。ウェブの要素分割に関して、等曲げを受ける桁の場合、ウェブの板幅方向を 16 等分割、純せん断を受ける桁の場合、ウェブの板幅方向を 10 等分割することによって十分な精度を有する結果が得られることが示されているので^{2),9)}、ウェブの板幅方向の要素分割は 16 等分割以上とする。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 の範囲になるような分割とする。自由突出板の圧縮耐荷力に関して、板幅方向の要素分割を 4 等分割以上にすれば十分な精度の結果が得られることが示されている¹⁰⁾。したがって、フランジ、端補剛材、荷重載荷点直下の垂直補剛材の片側の板幅方向および中間垂直補剛材の板幅方向の要素分割を 4 等分割以上とする。端補剛材から外側の桁の張出し長さは $12t_w$ とする。

図 2.7 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。

$$w_0 = \frac{b_w}{250} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_w + t_f}\right) \quad (2.7.a)$$

$$m = \frac{a}{0.5b_w} \quad (2.7.b)$$

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)¹¹⁾ で規定される桁ウェブの製作精度である。式(2.7.b)は、面内曲げを受ける長方形板の耐荷力を最も低くする初期たわみモード数である¹²⁾。

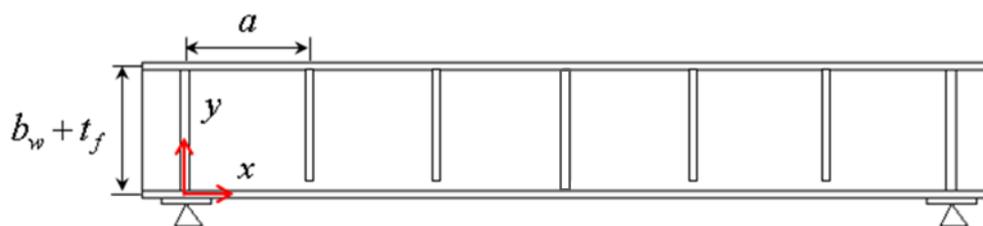


図 2.7 ウェブの初期たわみ

解析値を表 2.4、耐荷力相関曲線と解析値の比較を図 2.8 に示す。さらに、終局時の桁ウェブの面外変形を付録 A に示す。

表 2.4 の P_u は、支間中央の点 C を鉛直下向きに強制変位させることによって生じる反力が増加しなくなったときの値である。 P_u と桁が終局時に達した時の支点反力 V_u との間には次の関係がある。

$$V_u = \frac{P_u}{2} \quad (2.8)$$

さらに、桁が終局時に達した時の支間中央の点 C の曲げモーメント M_{Cu} は、 V_u を式(2.4)の V に

用いることによって与えられる。

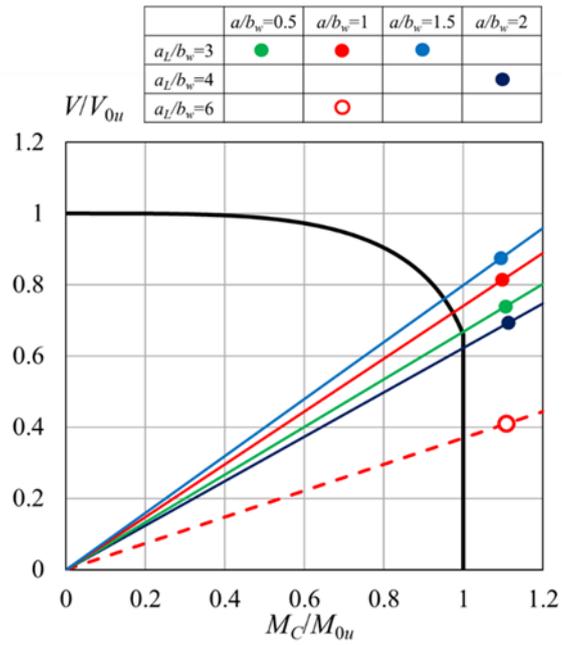
他方、表 2.4 の推定値 P_u は、式(2.4)と(2.8)を式(2.1)に代入し、 P_u について解いて次式で与えられる。

$$P_u = \begin{cases} \frac{2V_{0u}}{\left\{0.81 \left(\frac{a_L b_w V_{0u}}{b_w M_{0u}}\right)^4 + 1\right\}^{0.25}} & \left(0.66 \leq \frac{M_{0u} b_w}{b_w V_{0u} a_L} \leq 1\right) \\ \frac{2M_{0u} b_w}{b_w a_L} & \left(0 \leq \frac{M_{0u} b_w}{b_w V_{0u} a_L} \leq 0.66\right) \end{cases} \quad (2.9)$$

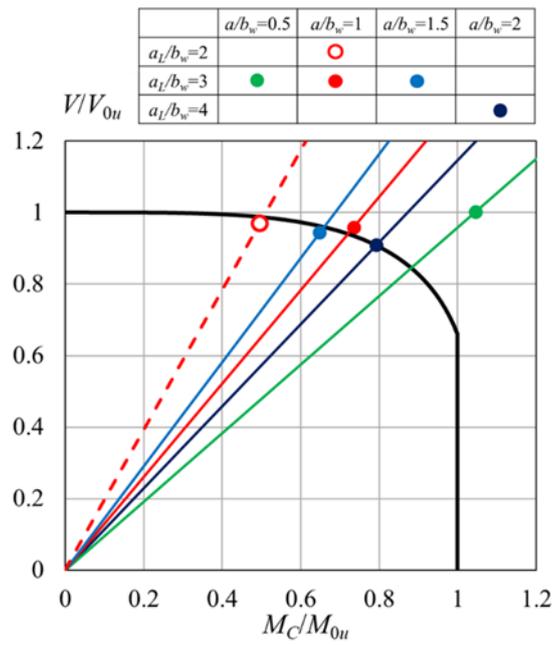
表 2.4 から分かるように、 $b_w/t_w = 90$ の桁の場合、解析値 P_u は推定値 P_u より 10%程度大きく、 $b_w/t_w = 220$ の桁の場合、解析値 P_u は推定値 P_u より 2%程度低くなる場合があるが、この低下は小さい。したがって、 $0.5 \leq a/b_w \leq 2$ の範囲で中間垂直補剛材が設けられた A5083-O 桁に対しても式(2.1)が適用できる。

表 2.4 解析値と推定値

b_w/t_w	a/b_w	a_L/b_w	解析値			推定値	$\frac{P_u}{P_u}$ [解析値]
			P_u (N)	V_u/V_{0u}	M_{Cu}/M_{0u}	P_u (N)	$\frac{P_u}{P_u}$ [推定値]
90	0.5	3	757468	0.740	1.106	683224	1.11
	1	3	752324	0.814	1.098	666993	1.13
		6	379393	0.411	1.108	342489	1.11
	1.5	3	748908	0.874	1.093	651859	1.15
	2	4	571637	0.694	1.113	513734	1.11
220	0.5	3	274114	1.003	1.046	231039	1.19
	1	2	194644	0.970	0.495	198061	0.99
		3	192535	0.959	0.735	188299	1.02
	1.5	3	170016	0.944	0.649	172713	0.98
	2	4	155656	0.908	0.792	155644	1.00



(a) $b_w/t_w = 90$



(b) $b_w/t_w = 220$

図 2.8 耐力力相関曲線と解析値の比較

第3章 ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の曲げとせん断の

組合わせ耐荷力

3.1 ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁

アルミニウム合金 A6061-T6 の押出型材を摩擦攪拌接合によって突合わせ接合することによって製作された、ウェブが 3 本の縦補剛材によって等間隔に補剛された桁の断面を図 3.1 に示す。桁は上下対称であり、縦補剛材の断面寸法は次式で与えられる¹³⁾。

$$\frac{t_r}{t_w} = 0.578 \left(\frac{b_w}{t_w} - 12.5 \right)^{0.148} \quad \left(44 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 294 \right) \quad (3.1.a)$$

$$\frac{b_r}{t_r} = 6.28 \quad (3.1.b)$$

- ここに、 b_r : 縦補剛材の板幅 (図 3.1 参照)
 t_r : 縦補剛材の板厚 (図 3.1 参照)
 b_w : ウェブの板幅 (図 3.1 参照)
 t_w : ウェブの板厚 (図 3.1 参照)

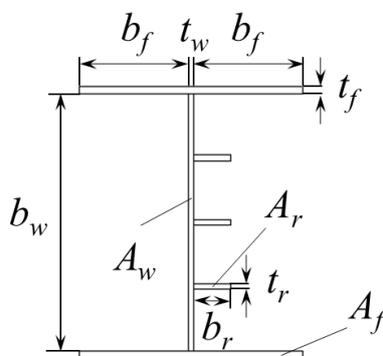


図 3.1 ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の断面

式(3.1)は、隣接する縦補剛材で区切られた板要素が 4 (縦補剛材の本数が 3) の場合、面内曲げを受ける、縦補剛された長方形板の座屈強度を最大にするような断面形状、すなわち最適断面形状を与える¹⁴⁾。面内曲げ座屈強度に関する最適断面形状を有する、縦補剛された長方形板の面内曲げ耐荷力は板要素数の増加に伴って増加するが、板要素数が 4 (縦補剛材の本数が 3) の面内曲げ耐荷力から板要素数が 5 (縦補剛材の本数が 4) の面内曲げ耐荷力の増加はわずかである。縦補剛材はせん断力を担わないので、板要素数が 5 の場合の長方形板のせん断強度 $\tau_{0.2}bt$ ($\tau_{0.2}$: 0.2%せん断耐力, b : 長方形板の板幅, t : 長方形板の板

厚) は板要素数が 4 の場合のそれより大きく低下する。したがって、縦補剛された長方形板を、曲げを受ける桁のウェブに適用する場合、板要素数 4 が最適である³⁾。

ウェブに対して式(3.1)で規定された断面形状を有する A6061-T6 桁が等曲げモーメントを受けるとき、フランジが横倒れ座屈と局部座屈を起こさない場合に対する終局曲げモーメント M_{0u} が次式で与えられている³⁾。

$$M_{0u} = g_w M_Y \quad (3.2.a)$$

$$g_w = \begin{cases} \frac{1 + \frac{A_{wr}}{4A_f}}{1 + \frac{A_{wr}}{6A_f}} & \left(44 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 62\right) \\ 1 - \frac{\frac{A_{wr}}{A_f} \left(\frac{b_w}{t_w} - 162\right)}{1200 \left(1 + \frac{A_{wr}}{6A_f}\right)} & \left(62 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 202\right) \\ \frac{1 + \frac{2A_{wr}}{15A_f} \left(\frac{202}{b_w/t_w}\right)^{0.94}}{1 + \frac{A_{wr}}{6A_f}} & \left(202 \leq \frac{b_w}{t_w} \leq 294\right) \end{cases} \quad (3.2.b)$$

$$A_{wr} = A_w + \frac{3}{2}A_r \quad (3.2.c)$$

- ここに、 M_Y : 桁の降伏曲げモーメント ($= \sigma_{0.2}W$)
 W : 桁の弾性断面係数
 $\sigma_{0.2}$: アルミニウム合金 A6061-T6 の 0.2%耐力 ($= 245\text{MPa}$)
 A_w : ウェブの断面積 (図 3.1 参照)
 A_f : 上下フランジ 1 枚の断面積 (図 3.1 参照)
 A_r : 縦補剛材 1 本の断面積 ($= b_r t_r$) (図 3.1 参照)

前述の桁が純せん断力を受ける場合の終局せん断力 V_{0u} が次式で与えられている⁴⁾。

$$\frac{V_{0u}}{V_Y} = \begin{cases} 1 & (R \leq 1.12) \\ \frac{5.79}{R} - \frac{3.29}{R^2} - 1.55 & (1.12 \leq R \leq 1.57) \\ \frac{1.36}{R^{1.18}} & (1.57 \leq R \leq 3.5) \\ \frac{0.858}{R^{0.81}} & (3.5 \leq R \leq 6.0) \end{cases} \quad (3.3.a)$$

$$V_Y = \tau_{0.2} b_w t_w = \frac{\sigma_{0.2}}{\sqrt{3}} b_w t_w \quad (3.3.b)$$

図 3.1 および図 3.2 を参照して、表 3.1 の記号の説明は次の通りである。

b_w	: ウェブの板幅
t_w	: ウェブの板厚
b_r	: 縦補剛材の板幅
t_r	: 縦補剛材の板厚
b_f	: フランジの片側の板幅
t_f	: フランジの板厚
b_s	: 端補剛材の片側の板幅
t_s	: 端補剛材の板厚
b_c	: 集中荷重直下の垂直補剛材の片側の板幅
t_c	: 集中荷重直下の垂直補剛材の板厚
A_w	: ウェブの断面積
A_f	: 上下フランジ 1 枚の断面積

式(3.2.b)から分かるように、 $b_w/t_w = 162$ は、桁が降伏モーメントに達するときのウェブ幅厚比である。縦補剛材の板幅 b_r と板厚 t_r は式(3.1)に従って算出されている。ウェブとフランジの断面積比 A_w/A_f は 1 である。

フランジおよび端補剛材の断面寸法は、桁の材料を A6061-T6 として、ALST 研究レポート No.56 の 2.1 節および 2.2 節の設計法に従って決められている。集中荷重直下の垂直補剛材の断面寸法は、本レポートの 2.2 節で述べた方法に従い、図 2.4 を参照して、A6061-T6 桁のウェブ断面全体が降伏するときのせん断強度を V_Y に用いる。フランジ、端補剛材、集中荷重直下の垂直補剛材の局部座屈を防ぐために、これらを自由突出板とみなして、A6061-T6 の自由突出板が 0.2%耐力を維持する限界の幅厚比として 6.28 を用いる¹⁰⁾。

a_L/b_w に対して表 3.2 に示す値を持つ桁を解析対象とする。同表の M_{0u} および V_{0u} の値は、それぞれ、式(3.2)、(3.3)で与えられる。各桁に対して、表 3.2 の値を式(2.5)に用いて得られる V/V_{0u} と M_c/M_{0u} の関係を後述の図 3.6 示す。

表 3.2 解析対象の桁とその特性値

b_w/t_w	a_L/b_w	M_{0u} (N・mm)	V_{0u} (N)	$\frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}}$	$\frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}} \frac{b_w}{a_L}$
162	4	8094908591	1026140	4.870	1.218
	6		985750	5.070	0.845
	8		956552	5.224	0.653

3.3 有限要素法による弾塑性有限変位解析

A6061-T6 の応力-ひずみ関係に対して、0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ を 245MPa、ひずみ硬化パラメータ n の値を 29.1 として、式(2.6)が与える関係を用いる⁶⁾。

A6061-T6の押出型材の突合わせ接合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。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の範囲のウェブ厚を、次式で与え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とることができる¹¹⁾。

$$t_{wj} = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{j0.2}} t_w = \frac{245}{105} t_w = 2.33t_w \quad (3.4)$$

ここに、 t_{wj} : ウェブの摩擦攪拌接合部（接合中心から各側25mm、すなわち50mmの範囲）の板厚

t_w : ウェブ母材の板厚

$\sigma_{0.2}$: ウェブ母材の0.2%耐力 (=245MPa)

$\sigma_{j0.2}$: 摩擦攪拌接合部の0.2%耐力¹¹⁾ (=105MPa)

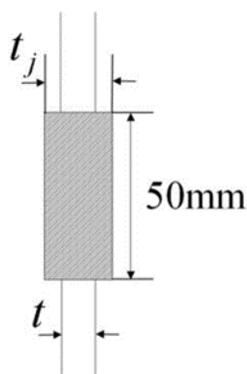


図 3.3 部分的に増厚された板

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^{2),15)}。したがって、摩擦攪拌接合による接合部の強度低下および残留応力は考慮せず、非接合桁だけを考慮する。

図 3.4 を参照して、解析対象の境界条件を表 3.3 に示す。境界条件は、2.3 節の境界条件と同じである。

表 3.3 境界条件

	変位		
	x 軸方向	y 軸方向	z 軸方向
辺 IJ	0	強制変位 d_u	1
辺 BE, 辺 GH	0	0	1
辺 AC	1	1	1
辺 DF	0	1	1

注：0 と 1 は、それぞれ自由と拘束を表す。

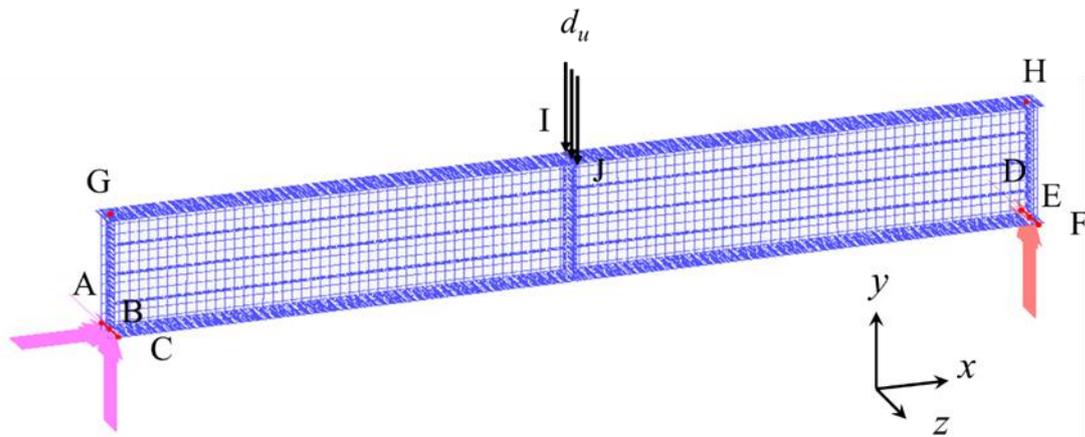


図 3.4 表 3.3 の参照図

汎用有限要素法解析プログラム MARC⁸⁾を用いて弾塑性有限変位解析を行う。有限要素として 8 節点シェル要素 (MARC における要素番号 22) を用いる。

曲げとせん断を受ける、ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁に対して、フランジ、端補剛材、載荷点直下の垂直補剛材の要素分割は 2.3 節で述べた A5083-O 桁と同様である。縦補剛材の板幅方向の要素分割は 5 等分割とする¹⁴⁾。縦補剛材の端は端補剛材および集中荷重点の垂直補剛材に連結しない。端補剛材から外側の桁の張出し長さは $12t_w$ とする。耐荷力 V_u/V_Y とウェブの板幅方向の要素分割数の関係を表 3.4 に示す。 V_Y は式(3.3.b)で与えられるウェブ全体が降伏するときのせん断強度である。ウェブの板幅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。表 3.4 より、ウェブの板幅方向の要素分割数が 8 から 16 の間で V_u/V_Y の低下はわずかであるので、ウェブの板幅方向の要素分割は 16 等分割とする。

表 3.4 耐力力 V_u/V_Y とウェブの板幅方向の要素分割数の関係

a_L/b_w	ウェブの板幅方向の要素分割数		
	8	12	16
4	0.460	0.453	0.449
6	0.383	0.381	0.380
8	0.291	0.287	0.287

図 3.5 を参照して、ウェブの面外方向の初期たわみ w_0 に対して次式を仮定する。

$$w_0 = \frac{b_w}{250} \sin\left(\frac{m\pi x}{a_L}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b_w + t_f}\right) \quad (3.5)$$

ここに、 m : 自然数

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）¹¹⁾で規定される桁ウェブの製作精度である。自然数 m は次式を満たす値である。

$$m = 1 \quad \left(\frac{a_L}{e} < 0.5\right) \quad (3.6.a)$$

$$\frac{a_L}{e} - 0.5 < m \leq \frac{a_L}{e} + 0.5 \quad \left(0.5 \leq \frac{a_L}{e}\right) \quad (3.6.b)$$

ここで、 e は曲げを受ける、縦補剛された長方形板の半波長であり、次式で与えられる¹⁴⁾。

$$e = \frac{2}{3} b_w \left\{ 1 + \frac{16(1 - \mu^2)(b_r/t_r)^3 (t_r/t_w)^4}{b_w/t_w} \right\}^{0.25} \quad (3.7)$$

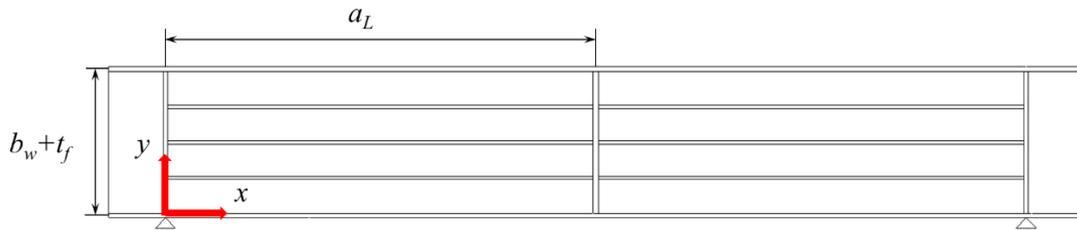


図 3.5 初期たわみ

解析値を表 3.5、耐力力相関曲線と解析値の比較を図 3.6 に示す。さらに、終局時の桁ウェブの面外変形を付録 B に示す。表 3.5 の解析値 V_u/V_{0u} と M_{Cu}/M_{0u} および推定値 P_u の算出方法は 2.3 節と同じである。同表から分かるように、解析値 P_u は推定値 P_u より 5~12%大きい。したがって、ウェブに対して式(3.1)で規定される断面形状を有する A6061-T6 桁の耐力力を式(2.1)によって評価することができる。

表 3.5 解析値と推定値

b_w/t_w	a_L/b_w	解析値			推定値	P_u [解析値]
		P_u (N)	V_u/V_{0u}	M_{Cu}/M_{0u}	P_u (N)	P_u [推定値]
162	4	2073853	1.011	0.830	1897390	1.09
	6	1746413	0.886	1.048	1554114	1.12
	8	1315604	0.688	1.053	1249362	1.05

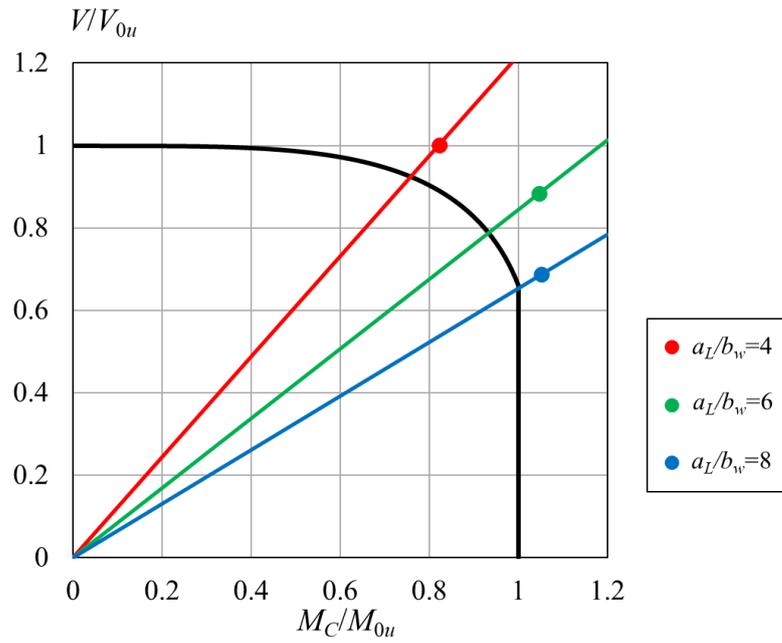


図 3.6 耐荷力相関曲線と解析値の比較

第4章 異種アルミニウム合金桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力

4.1 解析対象

序論で述べた異種アルミニウム合金桁は、中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁とウェブが縦補剛された A6061-T6 桁が高力ボルト摩擦接合継手によって連結された構造である。高力ボルト摩擦接合継手は、曲げモーメントとせん断力を伝達することが第一義の構造要素であるが、ウェブが連結板で両側から挟まれるので、ウェブの面外変形が拘束され、中間垂直補剛材の役割を果たすと考えられる。本研究では、A5083-O 桁と A6061-T6 桁の各桁に式(2.1)を適用することにより、異種アルミニウム合金桁の耐荷力を評価する。

解析対象を図 4.1 に示す。A6061-T6 桁の断面寸法は表 3.1 と同様である。A5083-O 桁の断面寸法ならびに端補剛材と中間垂直補剛材の断面寸法を表 4.1 に示す。A5083-O 桁のウェブ幅厚比 b_w/t_w に対して 162 と 220 を考慮する。 $b_w/t_w = 162$ は A6061-T6 桁のウェブ幅厚比と同じ値である。隣接する中間垂直補剛材間のウェブパネルの縦横比 a/b_w に対して 0.75 と 1.5 を考慮する。ウェブとフランジの断面積比 A_w/A_f は 1 である。フランジ、中間垂直補剛材、端補剛材の断面寸法は、ALST 研究レポート No.56 の第 2 章に従って決められている。

A6061-T6 桁の集中荷重点直下の垂直補剛材の断面寸法を表 4.2 に示す。断面寸法は、A5083-O 桁の b_w/t_w の値によって異なり、その決め方は 2.2 節で述べた方法に従っている。図 2.4 を参照して、A5083-O 桁のウェブ断面全体が降伏するときのせん断強度を V_y に用い、垂直補剛材の材料は A6061-T6 とする。さらに、垂直補剛材の局部座屈を防ぐためにその幅厚比を 6.28 として¹⁰⁾、集中荷重点直下の垂直補剛材の断面寸法が決められている。

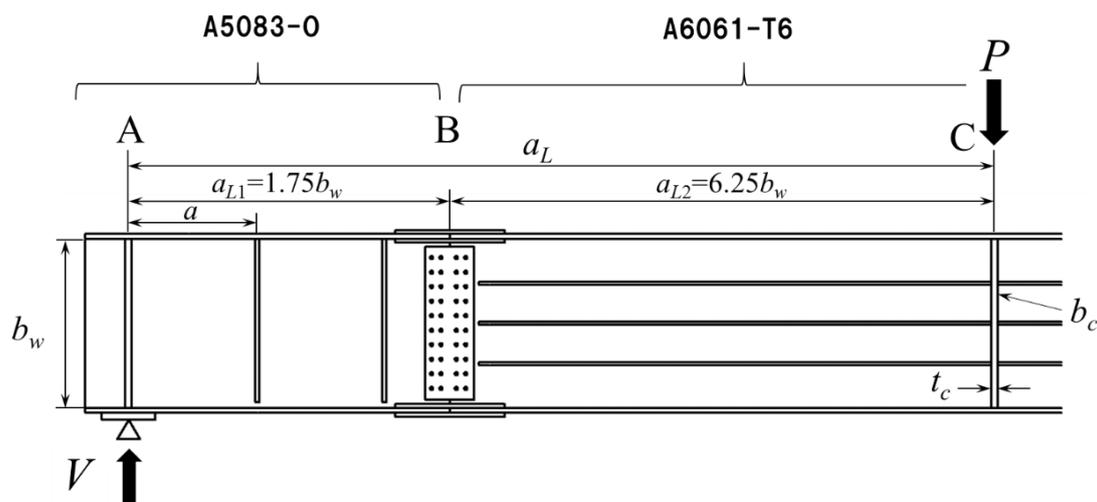


図 4.1 解析対象

表 4.1 A5083-O 桁の断面寸法

b_w/t_w	b_w (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	b_s (mm)	t_s (mm)	a/b_w	b_v (mm)	t_v (mm)
162	1619.8	10	215.6	36.7	149.1	25.4	0.75	77.9	13.3
							1.5	55.1	9.4
220	1619.8	7.4	185.3	31.6	142.1	24.2	0.75	61.9	10.6
							1.5	43.8	7.5

表 4.2 A6061-T6 桁の集中荷重点直下の垂直補剛材の断面寸法

A5083-O	A6061-T6	
b_w/t_w	b_c (mm)	t_c (mm)
162	157.0	25.0
220	125.0	19.9

図 4.2 に示すように、高力ボルト摩擦接合継手の存在を、継手部分の板厚を厚くすることによって考慮する。母材と同厚の連結板が使用されることを想定して、高力ボルト摩擦接合継手が存在する部分のフランジの板厚をフランジの板厚の 3 倍、ウェブの板厚をウェブの板厚の 3 倍とする。増厚された部分の材料は A6061-T6 とする。

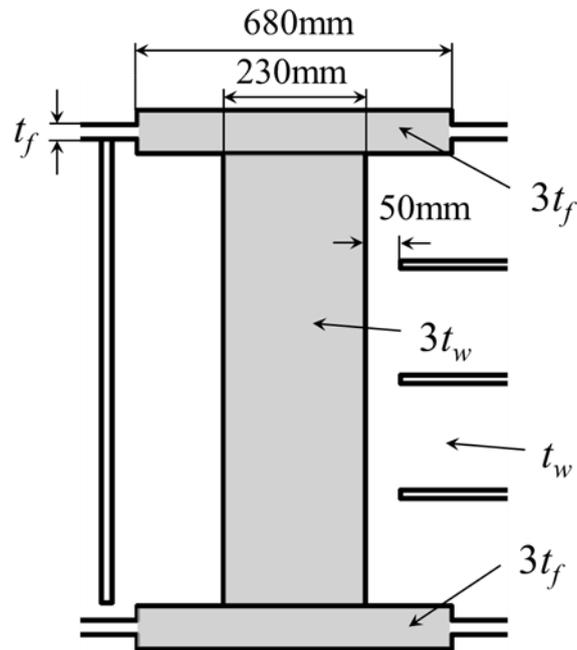


図 4.2 高力ボルト摩擦接合継手が存在する部分の板厚

A5083-O 桁および A6061-T6 桁のせん断力と曲げモーメントの関係が次式で与えられる。

A5083-O 桁

$$\frac{V}{V_{0u}} = \frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}} \frac{b_w}{a_{L1}} \frac{M_B}{M_{0u}} \quad (4.1)$$

A6061-T6 桁

$$\frac{V}{V_{0u}} = \frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}} \frac{b_w}{a_L} \frac{M_C}{M_{0u}} \quad (4.2)$$

各桁の特性値を表 4.3 に示す。式(4.1)と(4.2)が与えるせん断力と曲げモーメントの関係を後述の図 4.4 に示す。

表 4.3 各桁の特性値

(a) A5083-O

b_w/t_w	a_{L1}/b_w	a/b_w	M_{0u} (N · mm)	V_{0u} (N)	$\frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}}$	$\frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}} \frac{b_w}{a_{L1}}$
162	1.75	0.75	3605665569	782327	2.845	1.626
		1.5		632539	3.519	2.011
220		0.75	2609946061	456550	3.529	2.017
		1.5		369137	4.365	2.494

(b) A6061-T6

b_w/t_w	a_L/b_w	M_{0u} (N · mm)	V_{0u} (N)	$\frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}}$	$\frac{M_{0u}}{b_w V_{0u}} \frac{b_w}{a_L}$
162	8	8094908591	981746	5.090	0.636

4.2 有限要素法による弾塑性有限変位解析

汎用有限要素法解析プログラム MARC[®]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。図 4.3 を参照して、解析対象の境界条件を表 4.4 に示す。境界条件は、2.3 節の境界条件と同じである。

表 4.4 境界条件

	変位		
	x 軸方向	y 軸方向	z 軸方向
辺 IJ	0	強制変位 d_u	1
辺 BE, 辺 GH	0	0	1
辺 AC	1	1	1
辺 DF	0	1	1

注：0 と 1 は、それぞれ自由と拘束を表す。

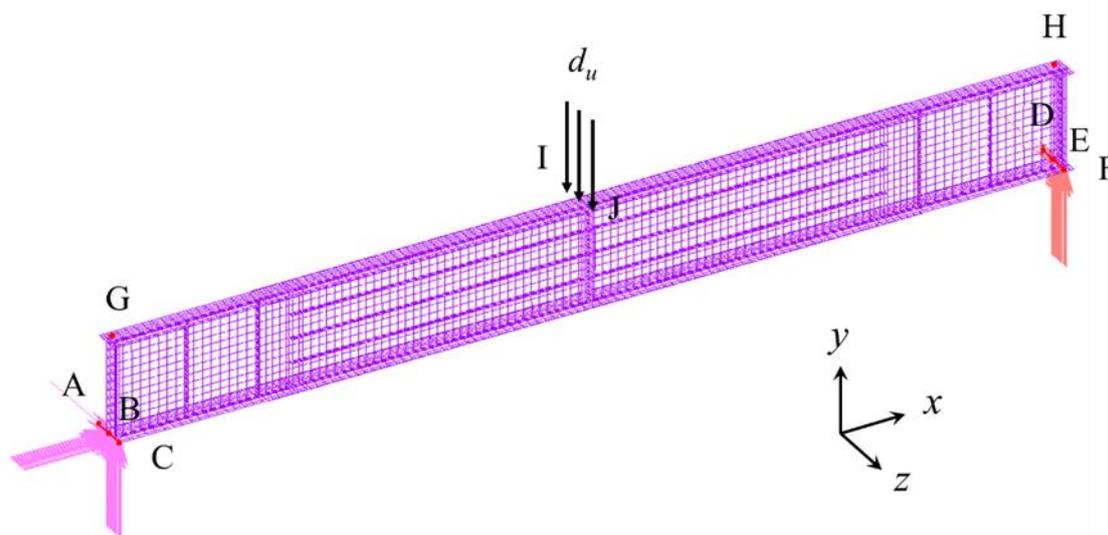


図 4.3 表 4.4 の参照図

A6061-T6 桁のウェブの板幅方向の要素分割は、表 3.4 に示すように、12 等分割の解析値が 16 等分割の解析値に近い値を示しているため、12 等分割とする。これを除いて、A6061-T6 桁と A5083-O 桁の要素分割は、それぞれ、3.3 節、2.3 節の要素分割に従う。A6061-T6 桁の縦補剛材の支間中央側の端は、荷重載荷点直下の垂直補剛材に連結しない。A5083-O 桁の端補剛材から外側の桁の張出し長さは $12t_w$ とする。

A5083-O 桁のウェブパネルの初期面外たわみ w_0 に対して式(2.7)を仮定する。ここで、桁の端部では、曲げモーメントに対してせん断力が大きいので、面内せん断を受ける長方形板の座屈形状を考慮して¹⁵⁾、 $a/b_w = 0.75$ と 1.5 の両者に対して、式(2.7.a)の m を 1 とする。

中間垂直補剛材で区切られた各ウェブパネルにこの初期面外たわみを正負交番させて与える。高力ボルト摩擦接合継手が存在する部分の A5083-O 桁のウェブの初期面外たわみはゼロとする。A6061-T6 桁のウェブの初期面外たわみ w_0 に対して式(3.5)を仮定する。ここで、式(3.5)の a_L を a_{L2} に置換える。支間中央に関して逆対称に初期面外たわみをウェブに与える。

解析値を表 4.5 に示す。式(4.1)と(4.2)の V に次式を代入することにより、 M_{Bu}/M_{Ou} と M_{Cu}/M_{Ou} の値が与えられる。

$$V_u = \frac{P_u}{2} \quad (4.3)$$

耐力力相関曲線と解析値の比較を図 4.4 に示す。A5083-O 桁または A6061-T6 桁のどちらかの解析値が耐力力相関曲線を上回って終局を迎える。図 4.4(a) の場合、A6061-T6 桁の解析値が耐力力相関曲線を超えるので、図 4.5(a) に示すように、A6061-T6 桁のウェブに大きな面外変形が生じて終局を迎える。図 4.4(d) の場合、A5083-O 桁の解析値が耐力力相関曲線を超えるので、図 4.5(d) に示すように、A5083-O 桁のウェブに大きな面外変形が生じて終局を迎える。図 4.4(b) の場合、A5083-O 桁と A6061-T6 桁の両者の解析値が耐力力相関曲線を超えるので、図 4.5(b) に示すように、A5083-O 桁と A6061-T6 桁の両方のウェブに大きな面外変形が生じて終局を迎える。以上より、異種アルミニウム合金桁の耐力力は、曲げとせん断の組み合わせ荷重に対して、A5083-O 桁と A6061-T6 桁のどちらか低い耐力力が桁全体の耐力力になる。

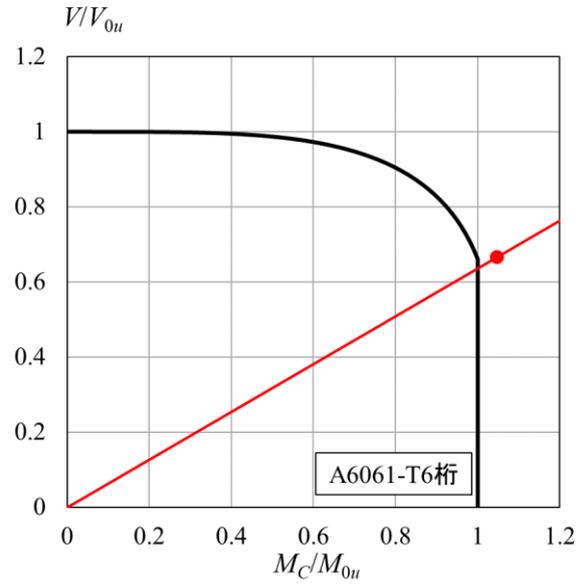
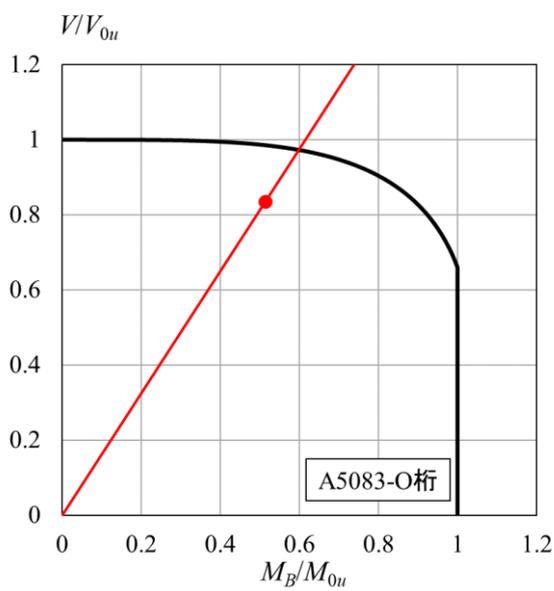
P_u の推定値を表 4.6 に示す。 P_u の推定値の算出方法は 2.3 節と同様で式(2.9)で与えられる。ここで、A5083-O 桁に対して、式(2.9)の a_L を a_{L1} に置換える。A5083-O 桁と A6061-T6 桁の推定値 P_u のどちらか小さいほうが桁全体の推定値 P_u になる。この推定値 P_u に対して解析値 P_u は 2%~7% 大きい。すなわち、A5083-O 桁と A6061-T6 桁の各桁に式(2.1)を適用することにより、異種アルミニウム合金桁の耐力力を安全側で評価することができる。

表 4.5 解析値

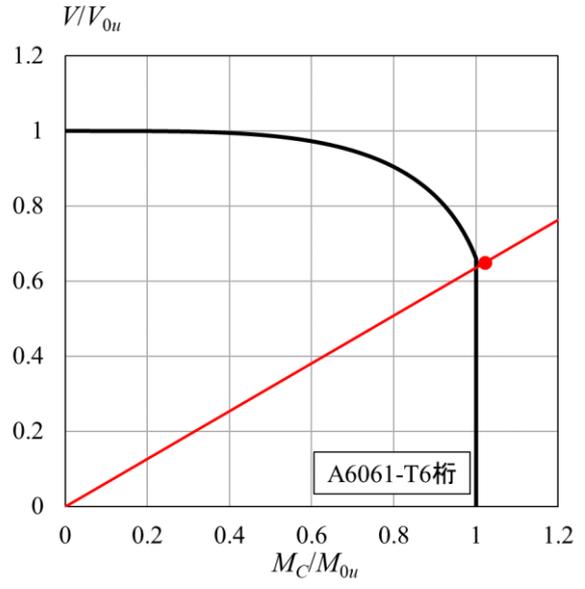
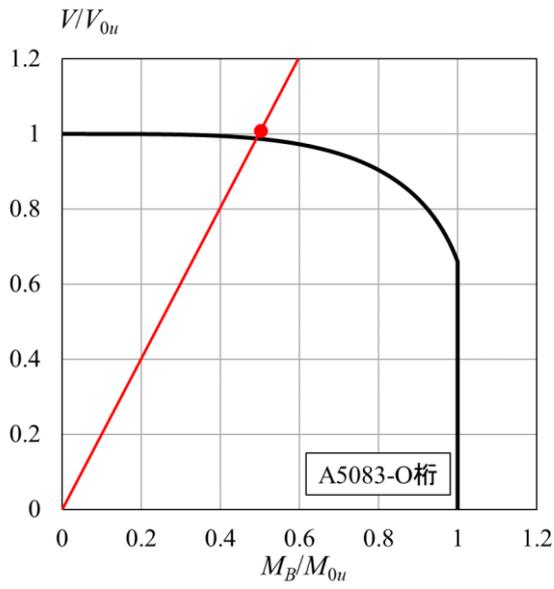
A5083-O				A6061-T6			P_u (N)
b_w/t_w	a/b_w	V_u/V_{Ou}	M_{Bu}/M_{Ou}	b_w/t_w	V_u/V_{Ou}	M_{Cu}/M_{Ou}	
162	0.75	0.836	0.514	162	0.666	1.047	1308652
	1.5	1.009	0.502		0.650	1.022	1276277
220	0.75	1.023	0.507		0.476	0.747	933855
	1.5	1.065	0.427		0.401	0.630	786531

表 4.6 推定値と解析値

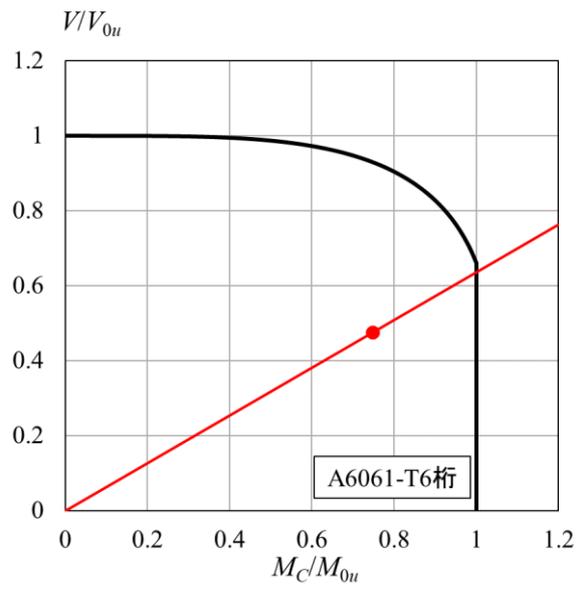
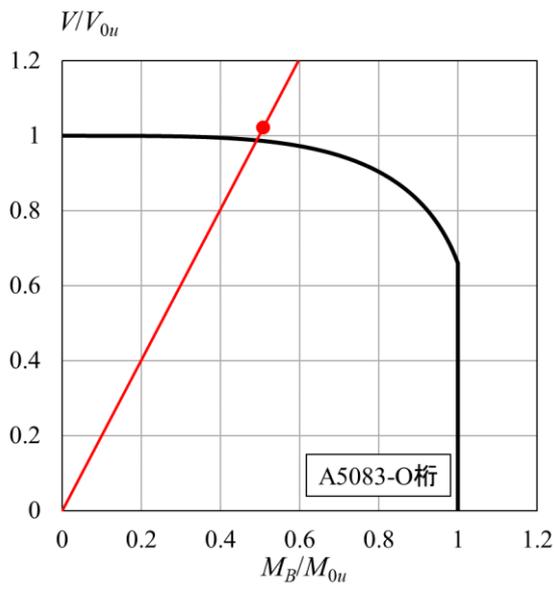
推定値					解析値		$\frac{P_u \text{ [解析値]}}{P_u \text{ [推定値]}}$
A5083-O			A6061-T6		P_u (N)	P_u (N)	
b_w/t_w	a/b_w	P_u (N)	b_w/t_w	P_u (N)			
162	0.75	1522324	162	1249362	1249362	1308652	1.047
	1.5	1249875			1249362	1276277	1.022
220	0.75	902247			902247	933855	1.035
	1.5	734460			734460	786531	1.071



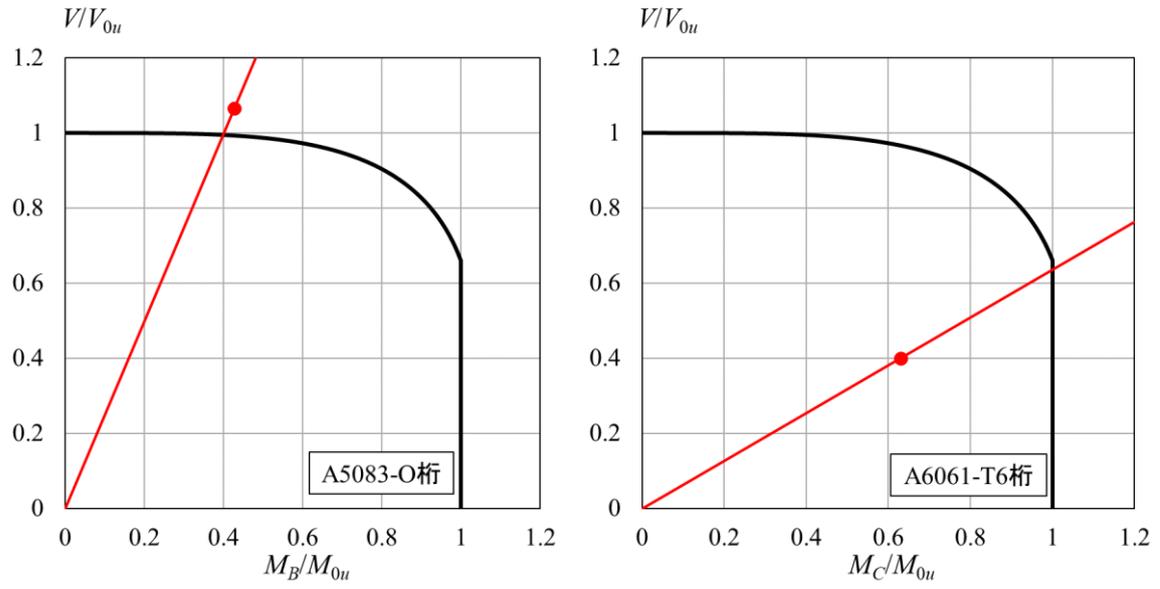
(a) $b_w/t_w = 162$, $a/b_w = 0.75$



(b) $b_w/t_w = 162$, $a/b_w = 1.5$

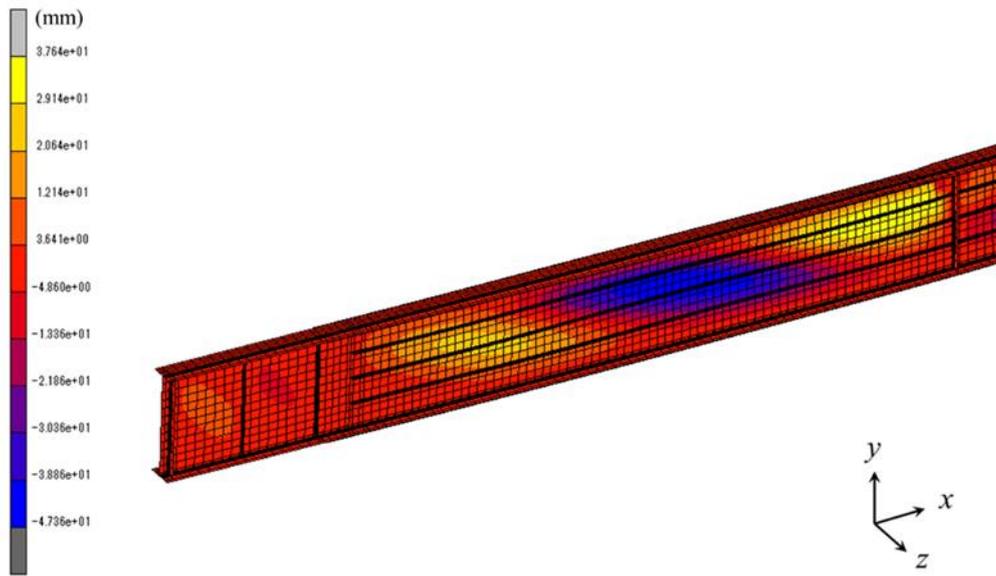


(c) $b_w/t_w = 220$, $a/b_w = 0.75$

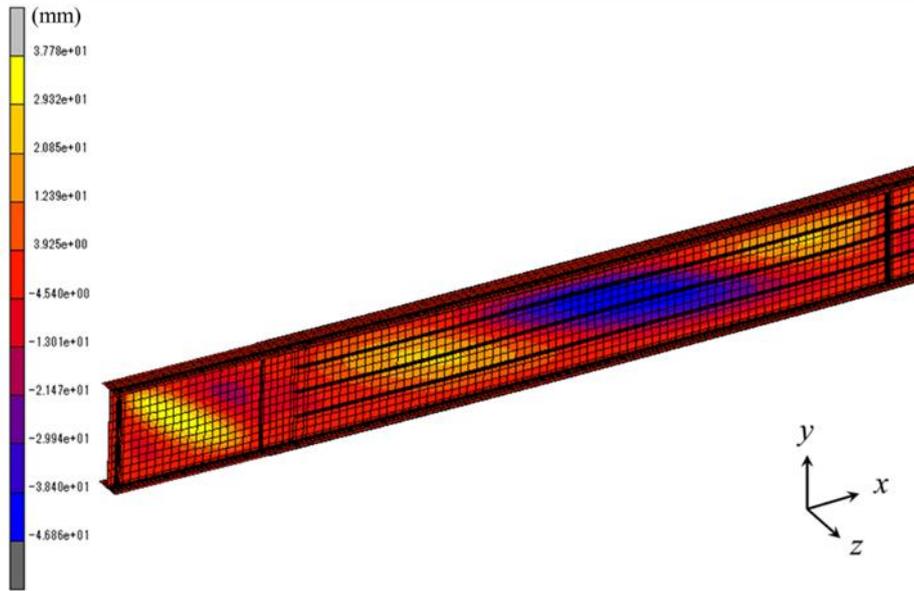


(d) $b_w/t_w = 220, a/b_w = 1.5$

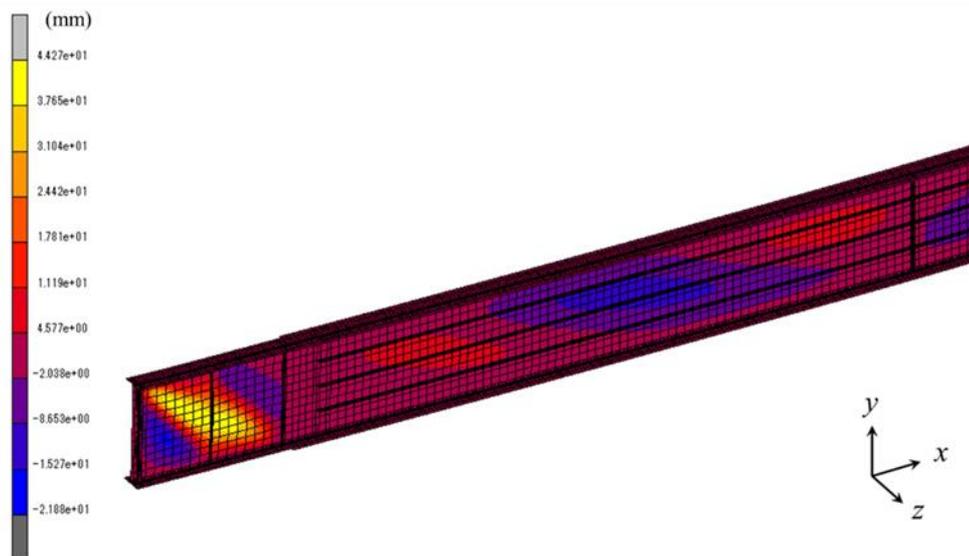
図 4.4 耐荷力相関曲線と解析値の比較



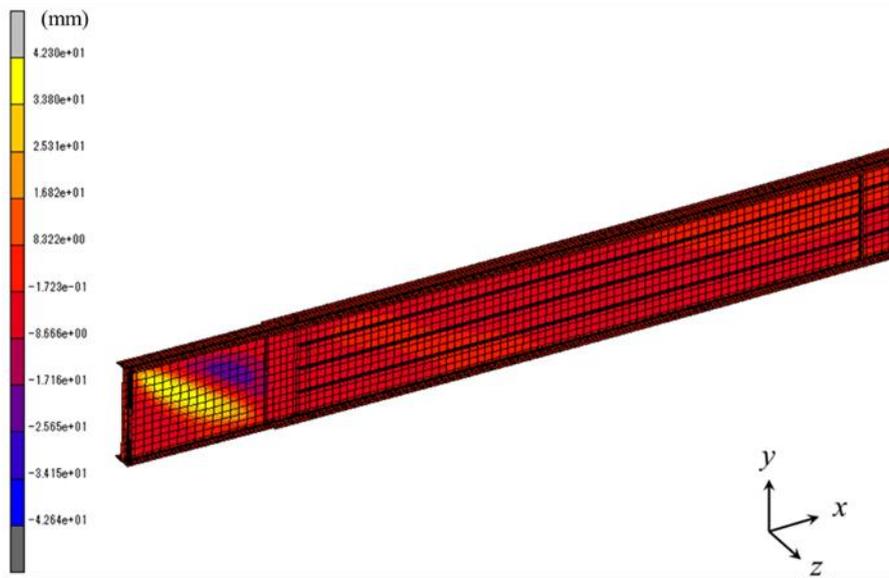
(a) $b_w/t_w = 162, a/b_w = 0.75$



(b) $b_w/t_w = 162$, $a/b_w = 1.5$



(c) $b_w/t_w = 220$, $a/b_w = 0.75$



(d) $b_w/t_w = 220$, $a/b_w = 1.5$

図 4.5 終局時の桁ウェブの面外変形

第5章 結論

異種アルミニウム合金桁の設計法を確立するために、本研究では、次の三つのテーマを扱った。

- 1) 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力
- 2) ウェブが縦補剛された A6061-T6 桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力
- 3) 異種アルミニウム合金桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力

本研究で得られた主な結論は次の通りである。

- (1) 中間垂直補剛材を有する A5083-O 桁において、隣接する中間垂直補剛材間のウェブパネルの縦横比が 0.5 から 2.0 の範囲で、桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力は式(2.1)によって評価することができる。
- (2) ウェブが3本の縦補剛材によって等間隔に補剛された A6061-T6 桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力は式(2.1)によって評価することができる。ここで、縦補剛材の断面寸法は式(3.1)によって規定される。
- (3) 異種アルミニウム合金桁の曲げとせん断の組合わせ耐荷力は、5083-O 桁と A6061-T6 桁の各桁に式(2.1)を適用し、どちらか低い耐荷力を有する桁が桁全体の耐荷力になる。

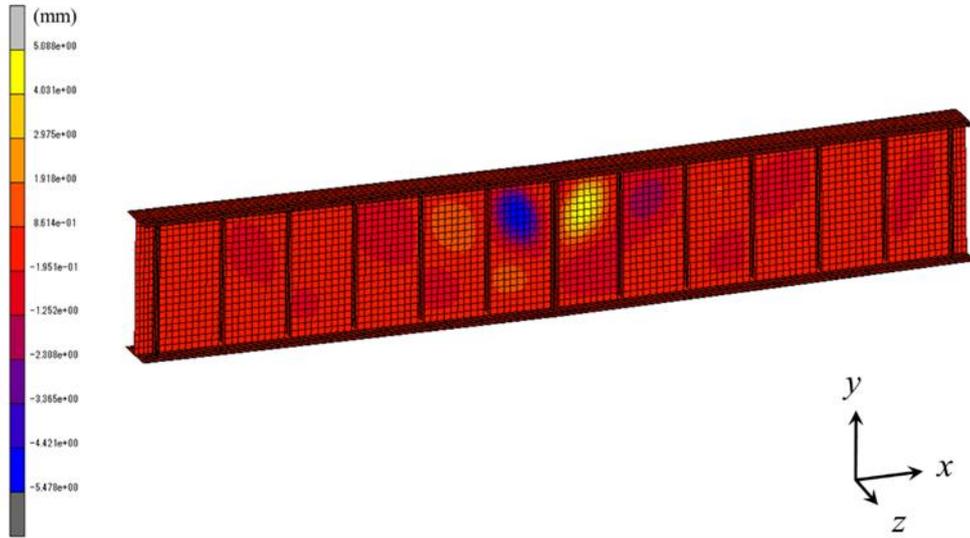
今後の課題

異種アルミニウム合金桁の弾塑性有限変位解析においては、A5083-O 桁と A6061-T6 桁を連結する高力ボルト摩擦接合継手がウェブの面外変形を拘束し、中間垂直補剛材の役割を果たすと想定して、この効果を継手部分の板厚を厚くすることによって考慮した。この仮定の真偽を実験によって確認する必要がある。

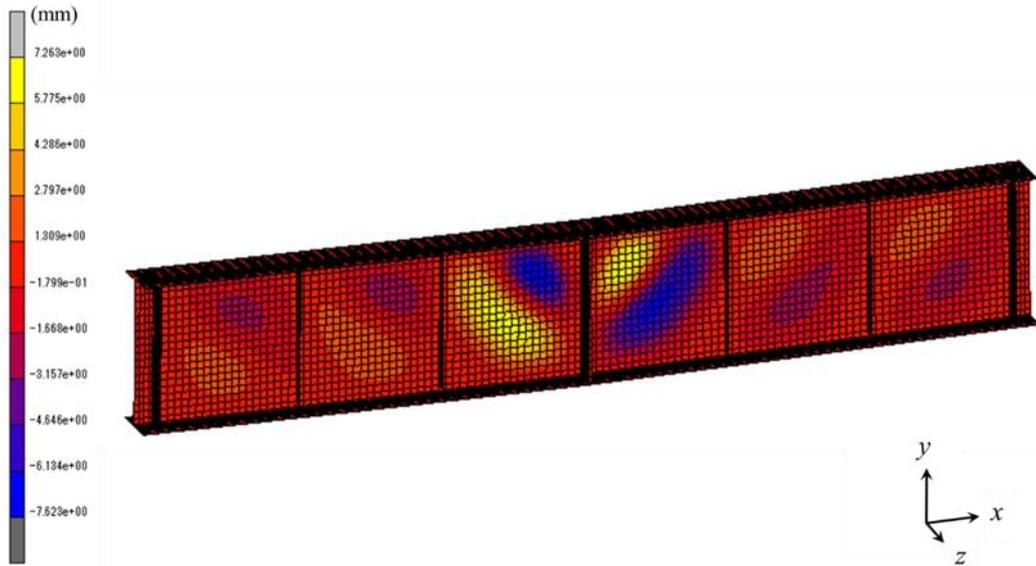
参考文献

- 1) 岩倉弘幸, 大倉一郎: 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, No.56, 2019.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 山木陸呂宇, 大倉一郎: 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, No.51, 2018.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) MSC.Software Corporation: Marc Mentat 2013.0.0.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 大倉一郎: アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針 改訂試案 1, ALST 研究レポート, No.55, 2019.
- 14) 清水弘樹, 大倉一郎: 面内曲げを受ける縦補剛されたアルミニウム合金板の最適断面形状と耐荷力, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.15-25, 2019.
- 15) 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.

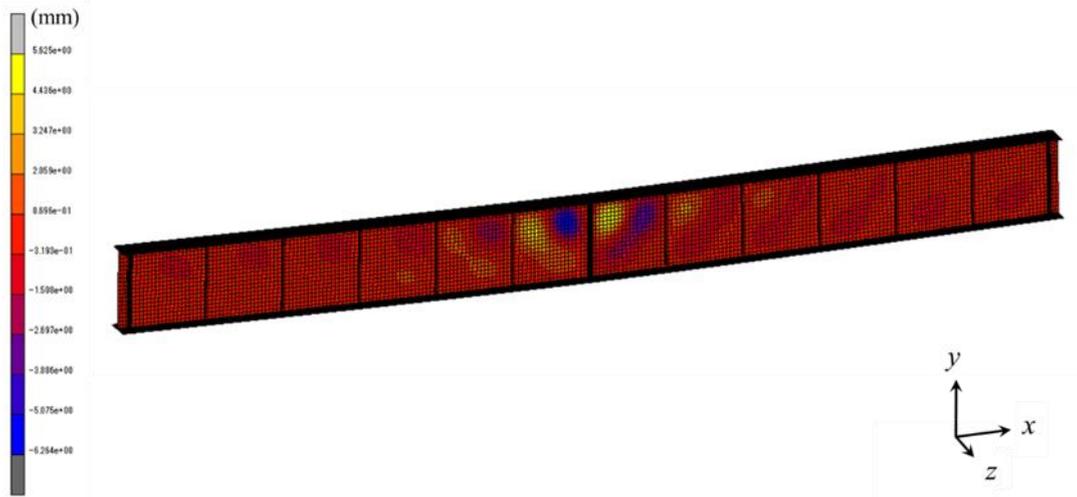
付録A 終局時の桁ウェブの面外変形 [表 2.4]



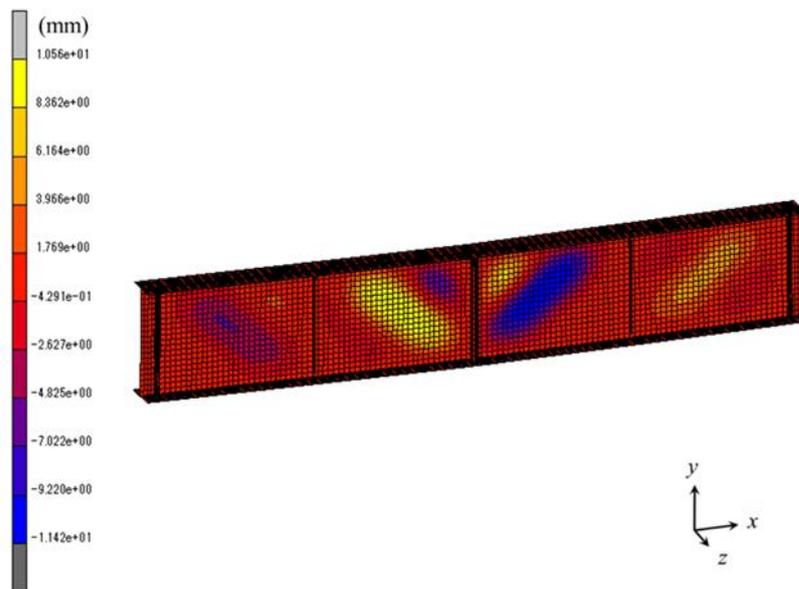
(a) $a/b_w = 0.5$, $a_L/b_w = 3$



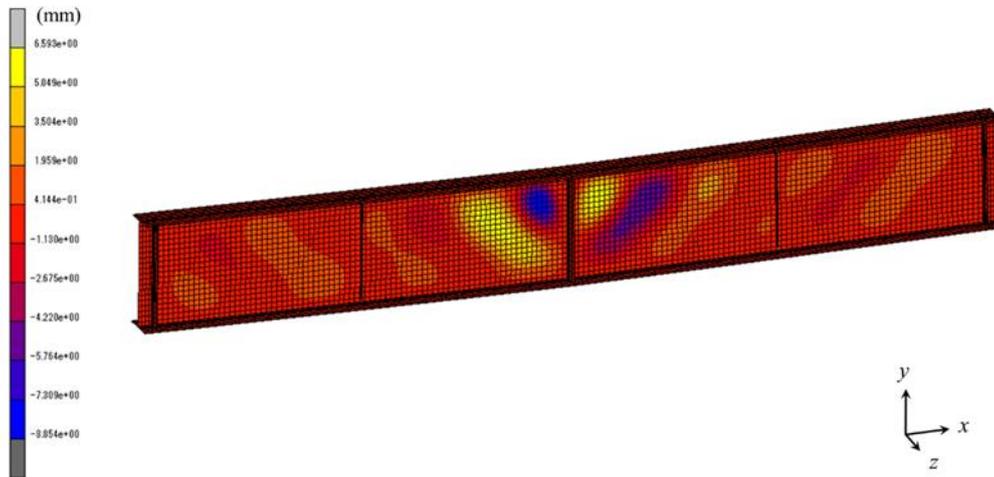
(b) $a/b_w = 1$, $a_L/b_w = 3$



(c) $a/b_w = 1, a_L/b_w = 6$

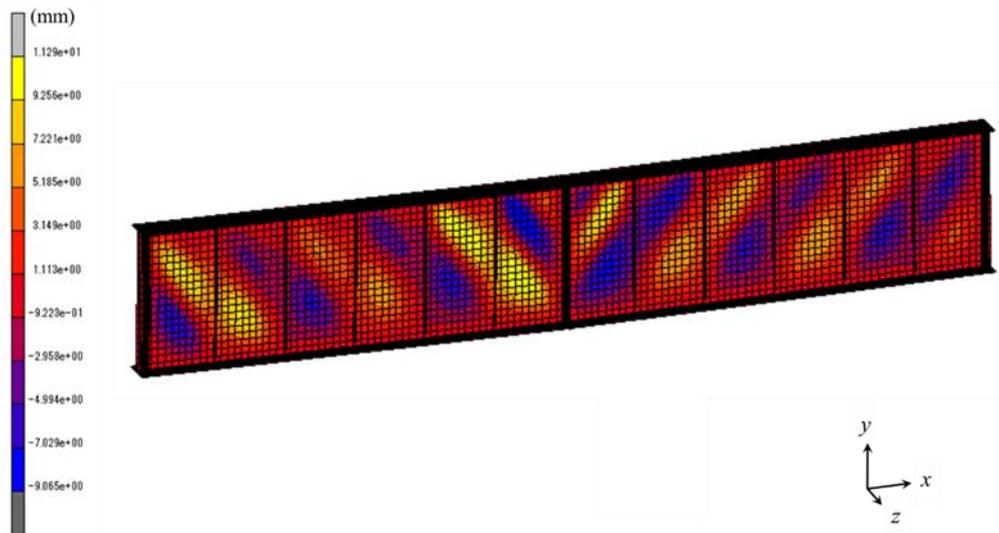


(d) $a/b_w = 1.5, a_L/b_w = 3$

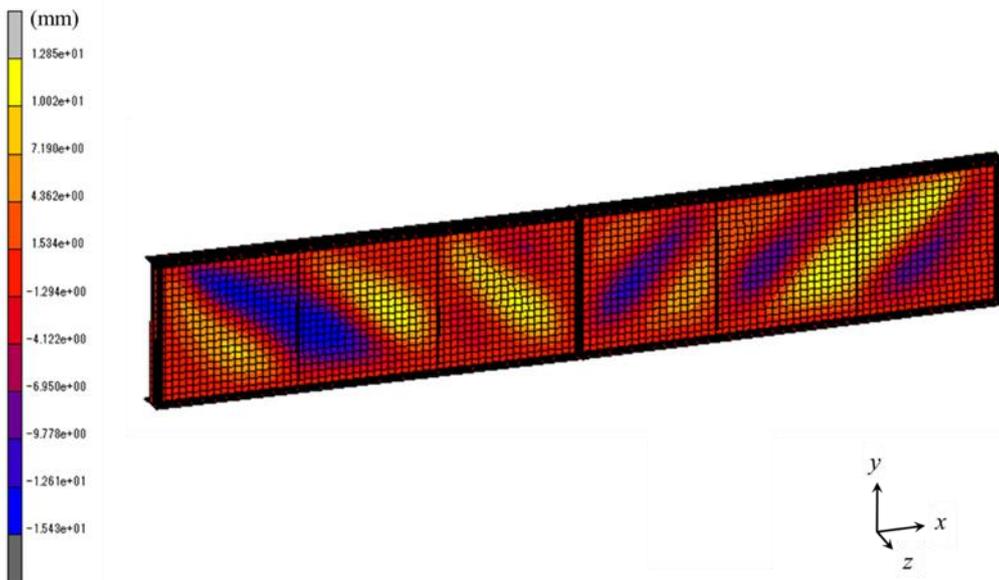
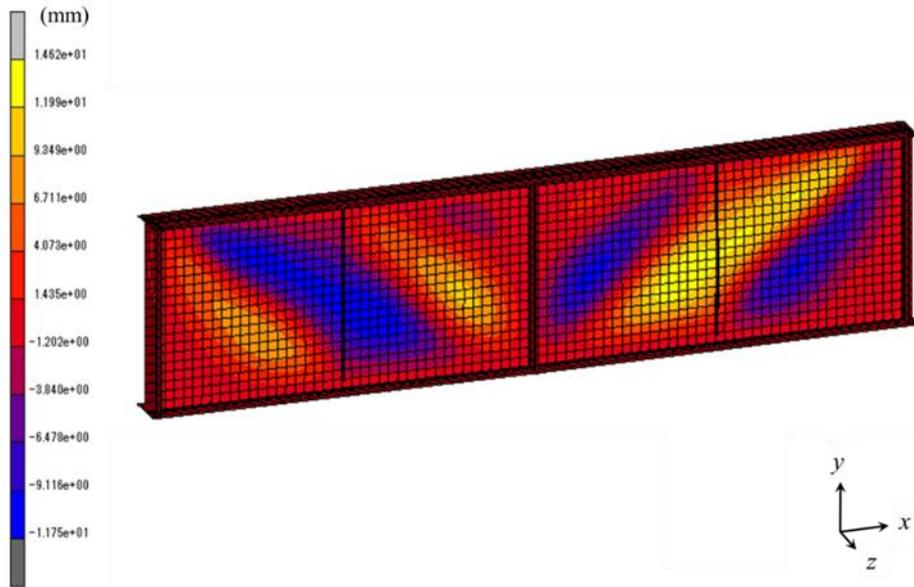


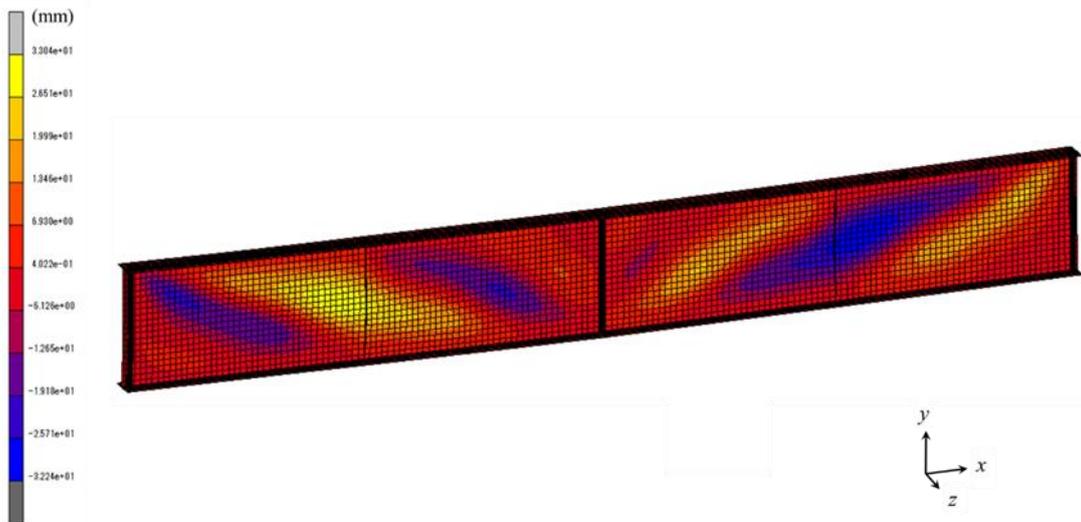
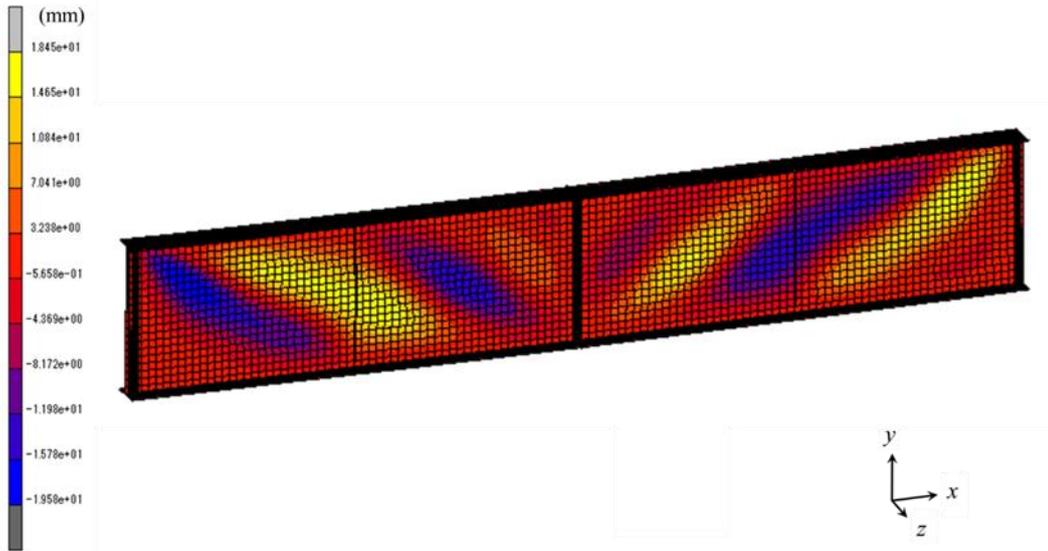
(e) $a/b_w = 2$, $a_L/b_w = 4$

☒ A.1 $b_w/t_w = 90$

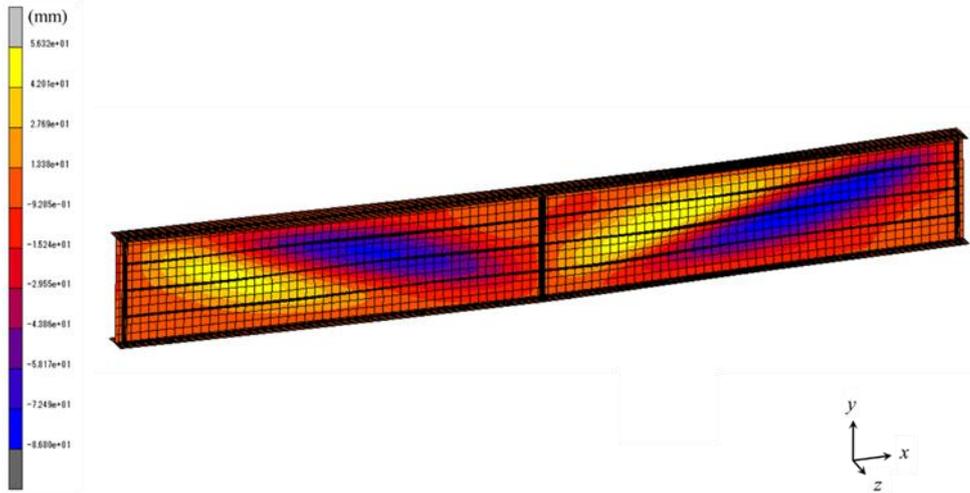


(a) $a/b_w = 0.5$, $a_L/b_w = 3$

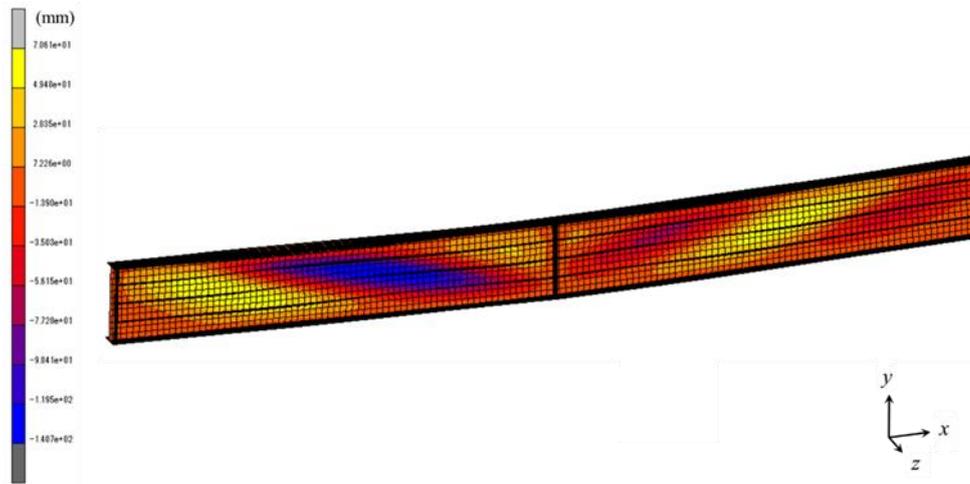




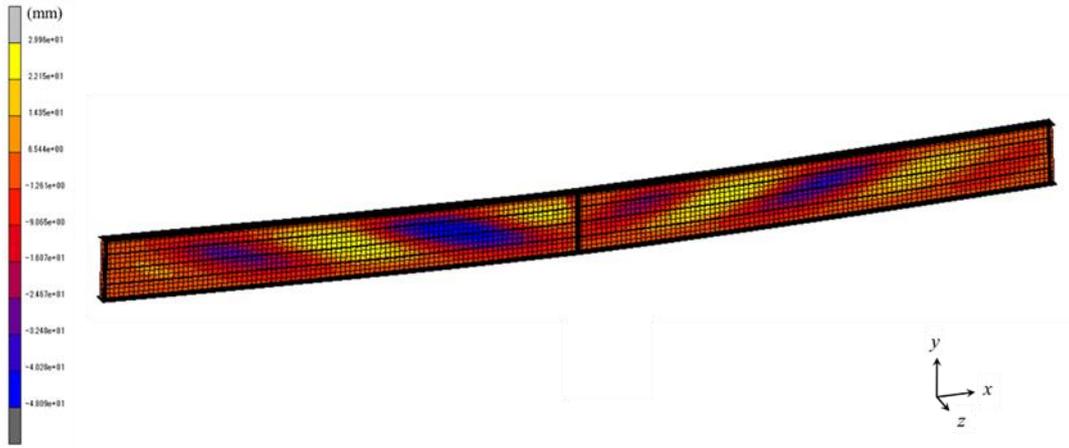
付録B 終局時の桁ウェブの面外変形 [表 3.5]



(a) $a_L/b_w = 4$



(b) $a_L/b_w = 6$



(c) $a_L/b_w = 8$