

面内せん断を受ける
アルミニウム長方形板の耐荷力

ALST 研究レポート 23

2012 年 3 月

大阪大学大学院工学研究科
寺川勝大, 大倉一郎

概要

本研究では、面内せん断を受ける長方形板の耐荷力を FEM による弾塑性有限変位解析によって明らかにする。考慮するアルミニウム合金は、熱処理アルミニウム合金 A6061-T6 と A6005C-T5 および非熱処理アルミニウム合金 A5083-O である。接合による残留応力と初期たわみ、熱処理アルミニウム合金においては接合部の強度低下を考慮する。本研究の成果に基づいて、面内せん断を受ける長方形板の耐荷力曲線を与える。

目次

第 1 章 序論	・・・1
第 2 章 面内せん断を受ける長方形板の座屈強度と座屈波形	・・・4
2.1 境界条件	・・・4
2.2 座屈解析	・・・5
2.3 せん断座屈係数と縦横比の関係	・・・7
第 3 章 弾塑性有限変位解析	・・・10
3.1 応力-ひずみ関係	・・・10
3.2 接合位置と強度低下の範囲	・・・12
3.3 初期たわみ	・・・13
3.4 残留応力	・・・14
3.5 境界条件	・・・15
3.6 要素分割数	・・・16
第 4 章 後座屈強度の発生現象	・・・19
4.1 後座屈強度	・・・19
4.2 $R=0.5$ の長方形板	・・・19
4.3 $R=1.6$ の長方形板	・・・21
第 5 章 6000 系アルミニウム合金板のせん断耐荷力	・・・25
5.1 初期たわみ波形がせん断耐荷力に与える影響	・・・25
5.2 最大初期たわみがせん断耐荷力に与える影響	・・・29
5.3 接合部の強度低下と残留応力がせん断耐荷力に与える影響	・・・31
5.4 中央増厚接合板のせん断耐荷力	・・・34
5.5 A6061-T6 板と A6005C-T5 板の耐荷力の比較	・・・37
5.6 せん断耐荷力と縦横比の関係	・・・39
第 6 章 A5083-0 板のせん断耐荷力	・・・41
6.1 残留応力がせん断耐荷力に与える影響	・・・41
6.2 せん断耐荷力と縦横比の関係	・・・43
第 7 章 耐荷力曲線	・・・44

7.1	耐荷力曲線の定式化	・・・44
7.2	Eurocode 9 の耐荷力曲線との比較	・・・48
第8章 結論		・・・50
参考文献		・・・52
付録 A		・・・54
付録 B		・・・56
B.1	A6061-T6 の FEM 解析値	・・・56
B.2	A6005C-T5 の FEM 解析値	・・・57
B.3	A5083-0 の非接合板の FEM 解析値	・・・58

第1章 序論

これまでアルミニウム合金は橋の高欄や道路の防護柵など付属品的な用途以外に土木構造物の主要部材として用いられることはほとんどなかった。しかし、耐食性に優れ、軽量であることから、2000年頃からアルミニウム歩道橋や拡張歩行者用アルミニウム床版が建設されるようになってきた¹⁾。最近で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るようになってきている²⁾。道路橋用アルミニウム床版を支える鋼桁もアルミニウム桁で製作することにより、メンテナンス・フリーが実現され、さらなる軽量化により、橋の耐震性の一層の向上を図ることができる。

現在建設されているアルミニウム歩道橋の設計は、道路橋示方書³⁾と立体横断施設技術基準⁴⁾に従い、アルミニウム合金の許容応力と製作はアルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案⁵⁾（以後、JAA指針と呼ぶ）に従っている。図-1.1に示すように、アルミニウム合金桁の構造は、鋼桁の構造と同じで、アルミニウム合金 A5083-O の圧延板のウェブとフランジが MIG 溶接で連結され、さらに垂直補剛材と水平補剛材がウェブに MIG 溶接で連結される。しかし、道路橋は歩道橋より規模が大きく、さらに道路橋の活荷重は歩道橋のそれより格段に大きくなるため、0.2%耐力の低い A5083-O で道路橋を設計することは困難である。したがって道路橋のアルミニウム合金桁の設計には、0.2%耐力の高い A6061-T6 および A6005C-T5 などの 6000 系アルミニウム合金の使用が必須である。しかし、これらの 6000 系アルミニウム合金は熱処理によって 0.2%耐力が高められているので、MIG 溶接を施すと接合部の 0.2%耐力が母材のその約半分ま

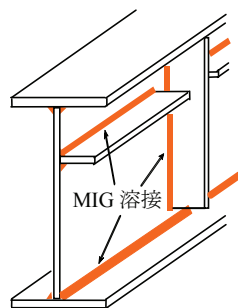


図-1.1 従来のアルミニウム合金桁

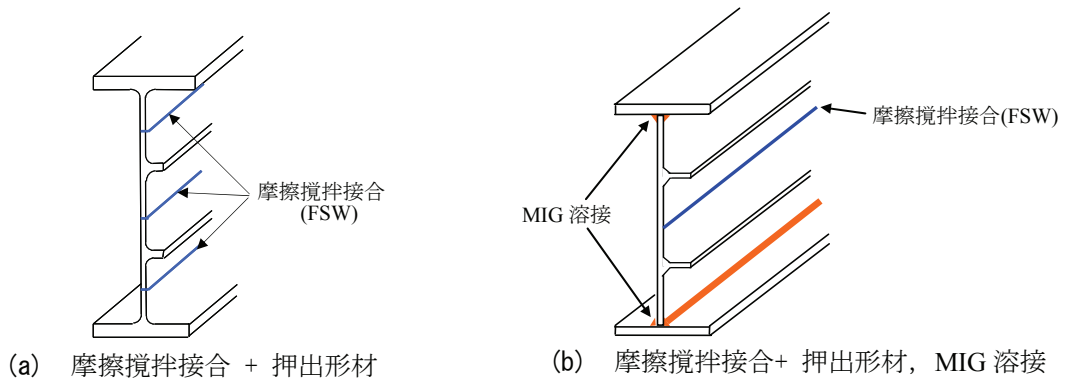


図-1.2 新しいアルミニウム合金桁

で低下する^{5),6)}。したがって、6000系アルミニウム合金で、図-1.1に示すような桁を製作した場合、垂直補剛材が存在する位置でMIG溶接がウェブの一断面を横断するため桁としての強度が低下する。

そこで、6000系アルミニウム合金の特徴を活かす桁構造として、図-1.2(a)に示すような、T型断面の押出型材を摩擦攪拌接合(FSW)によって突合せ接合し、ウェブの水平方向に、等間隔に突起を配置したアルミニウム合金桁が提案された⁷⁾。この桁構造にはウェブを鉛直方向に横断する接合がないため、ウェブの一断面で強度が低下することはない。さらに、図-1.2(a)に示す桁構造は、歩道橋にも適用でき、この場合、アルミニウム合金 A5083-O の使用も可能である。一般に、歩道橋では、疲労の問題を考慮する必要がないため、図-1.2(b)に示すように、摩擦攪拌接合によって製作される突起付きウェブを、MIG溶接による隅肉溶接でフランジに連結して桁を造ることも可能である。

ここで、摩擦攪拌接合とは、1991年に英国の溶接研究所で開発された固相接合法の一種で、現在、ロケット、航空機、自動車、鉄道車両、土木構造用アルミニウム床版の製造に使用されている^{1),6)}。図-1.3に示すように、互いに突合せされた一对のアルミニウム合金板の突合せ面に鋼製の回転工具を挿入し、回転工具の回転が起こす摩擦熱によってアルミニウム合金を塑性流動させ、回転工具を突合せ面に沿って移動させた後、接合部が冷却することにより接合される。摩擦攪拌接合による接合部の疲労強度は、MIG溶接による接合部の疲労強度より高いことが明らかにされている⁸⁾。

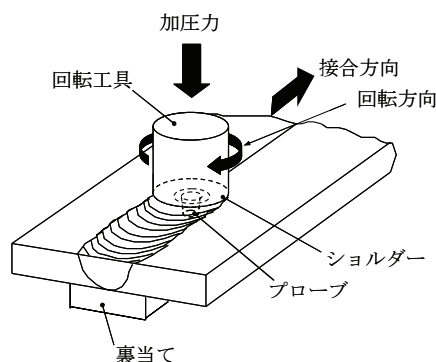


図-1.3 摩擦攪拌接合 (FSW)

図-1.2に示すアルミニウム合金桁の設計法を確立するために、これまで、圧縮を受ける両縁支持板の耐荷力⁹⁾、面内曲げを受ける両縁支持板の耐荷力¹⁰⁾、および圧縮を受ける自由突出板の耐荷力¹¹⁾が、有限要素法による弾塑性有限変位解析によって調べられた。そして、接合位置と接合部の強度低下、ならびに板幅が耐荷力に影響することが明らかにされた。

図-1.1に示す従来の桁に関しては、隣接する中間垂直補剛材間のウェブのせん断耐荷力を評価することを目的として、おおよそ0.5から2.0の間の縦横比の長方形板、多くは正方形板のせん断耐荷力について解析的研究がなされている^{12)~15)}。しかし、図-1.2に示すアルミニウム合金桁には中間垂直補剛材が設けられないので、2.0よりさらに大きな縦横比の長方形板のせん断耐

荷力を明らかにする必要がある。前述したように、圧縮または曲げを受けるアルミニウム合金板の耐荷力には、接合位置と接合部の強度低下，ならびに板幅が耐荷力に影響する。したがって、面内せん断を受けるアルミニウム合金板に対しても、これらの影響を明らかにしなければならない。

以上の背景より、本研究は、面内せん断を受ける長方形板の耐荷力を有限要素法による弾塑性有限変位解析によって明らかにし、その耐荷力曲線を提案することを目的とする。

第2章 面内せん断を受ける長方形板の座屈強度と座屈波形

2.1 境界条件

図-1.2 に示す，新しいアルミニウム合金桁では中間垂直補剛材が設けられないので，図-2.1 に示すように，縦横比 $\alpha=a/b$ が1以上の長方形板を解析対象とする．ここで， a と b は，それぞれ長方形板の長さおよび板幅である．

長方形板は，面外方向に対して周辺単純支持されている．桁のフランジおよび端補剛材の板曲げ剛性は小さいと仮定して，各辺の長さ方向に対して直角方向の変位は自由とする．長方形板の面内方向にせん断変形を起こさせる境界条件として，表-2.1 に示す三種類を考慮する．表中の u と v は，それぞれ x 軸方向変位， y 軸方向変位である．表-2.1 (a) は，下辺の水平変位を拘束し，上辺を水平方向に強制変位させる．表-2.1 (b) は，左辺の鉛直変位を拘束し，右辺を鉛直方向に強制変位させる．表-2.1 (c) は，左辺の鉛直変位と下辺の水平変位をともに拘束し，上辺を水平方向，右辺を鉛直方向に強制変位させる．

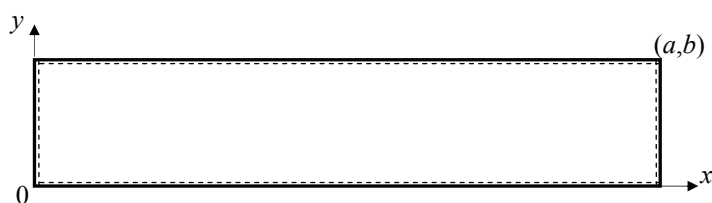


図-2.1 解析対象

表-2.1 境界条件

(a) 境界条件 A

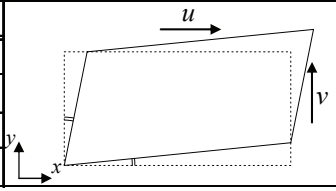
辺	u	v
$x=0$	自由	固定
$x=a$	自由	固定
$y=0$	固定	自由
$y=b$	変位量 d_x	自由

(b) 境界条件 B

辺	u	v
$x=0$	自由	固定
$x=a$	自由	変位量 d_y
$y=0$	固定	自由
$y=b$	固定	自由

(c) 境界条件 C

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



2.2 座屈解析

前節で述べた、長方形板の面内方向にせん断変形を起こさせる三種類の境界条件に対して座屈強度と座屈波形を得るために、汎用有限要素解析プログラム MARC¹⁶⁾を用いて座屈解析を行う。有限要素として 8 節点厚肉シェル要素 (MARC における要素番号 22) を用いる。MARC による弾塑性有限変位解析において、応力-ひずみ関係を線形とし、非正定値処理 (NON-Positive Definition) を実行しないことにより、全体剛性マトリックスの行列式 (Determinant) がゼロをとるとき、長方形板がせん断座屈を起こす。このとき生じるせん断応力がせん断座屈強度である。得られたせん断座屈強度を、次式で定義される基本座屈応力 σ_e で除してせん断座屈係数 k を得る。

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)\beta^2} \quad (2.1)$$

ここに、

E : ヤング率 (=70GPa)

μ : ポアソン比 (=0.3)

β : 幅厚比 (= b/t)

b : 板幅

t : 板厚

せん断座屈係数 k の値と要素分割数の関係を表-2.2 に示す。これは、表-2.1 (a) の境界条件 A に対する結果である。各有限要素の形状は正方形である。表-2.2 から、せん断座屈係数を求める際の板幅方向の要素分割数は、縦横比 α が 1.0~1.9 に対して 20 分割、 α が 2.0~3.9 に対して 10 分割、 α が 4.0 以上に対して 8 分割とする。

表-2.2 せん断座屈係数 k の値と板幅方向の要素分割数の関係

α	板幅方向の要素分割数			
	8分割	10分割	20分割	30分割
1	9.322	9.257	9.192	9.192
2	6.584	6.519	6.519	6.519
3	5.867	5.801	5.801	5.802
4	5.607	5.607	5.607	5.607
5	5.541	5.541	5.541	5.541
6	5.497	5.497	5.497	5.497
7	5.432	5.432	5.432	5.432
8	5.432	5.432	5.432	5.432

表-2.1の各境界条件に対する座屈係数 k の値を表-2.3に示す. 同表の境界条件Cに対しては,
 $u=v=d$ と $u=d$ かつ $v=ad$ の2ケースが考慮されている. 表-2.3から分かるように, 各境界条件に
 対するせん断座屈係数の値は, 数値計算上の誤差と考えられる範囲で一致している.

表-2.3 各境界条件に対する座屈係数 k の値

α	境界条件			
	A	B	C	
			$u=v=d$	$u=d$ $v=ad$
1	9.250	9.250	9.250	9.250
2	6.545	6.545	6.545	6.545
3	5.846	5.846	5.846	5.846
4	5.628	5.628	5.617	5.671
5	5.541	5.541	5.524	5.585
6	5.464	5.464	5.460	5.497
7	5.432	5.413	5.423	5.419
8	5.399	5.399	5.412	5.419

次に, 次式で定義されるせん断変形角 θ について考える.

$$\theta = \frac{u}{b} + \frac{v}{a} \quad (2.2)$$

ここに, u と v : それぞれ水平方向と鉛直方向の強制変位

表-2.1の各境界条件に対して, 長方形板がせん断座屈を起こすときの θ の値を表-2.4に示す.
 各境界条件に対する θ の値は, 数値計算上の誤差と考えられる範囲で一致している.

表-2.4 各境界条件に対するせん断変形角 θ の値

α	境界条件			
	A($\times 10^{-3}$)	B($\times 10^{-3}$)	C($\times 10^{-3}$)	
			$u=v=d$	$u=d$ $v=ad$
1	3.533	3.533	3.533	3.533
2	2.500	2.500	2.500	2.500
3	2.233	2.233	2.233	2.233
4	2.150	2.150	2.146	2.167
5	2.117	2.117	2.110	2.133
6	2.088	2.088	2.085	2.100
7	2.075	2.068	2.071	2.070
8	2.063	2.063	2.067	2.070

以上より，長方形板の面内方向にせん断変形を起こさせる三つの境界条件 A, B, C は，座屈係数 k および座屈時のせん断変形角 θ について同じ値をとる．

2.3 せん断座屈係数と縦横比の関係

せん断座屈係数 k と縦横比 α の関係を図-2.2 に示す．これは表-2.1 の境界条件 A に対する結果である．同図には次式で与えられる，理論値も記載されている¹⁷⁾．

$$k = 5.34 + \frac{4}{\alpha^2} \quad (2.3)$$

解析値は，式(2.3)の理論値にほぼ一致する．

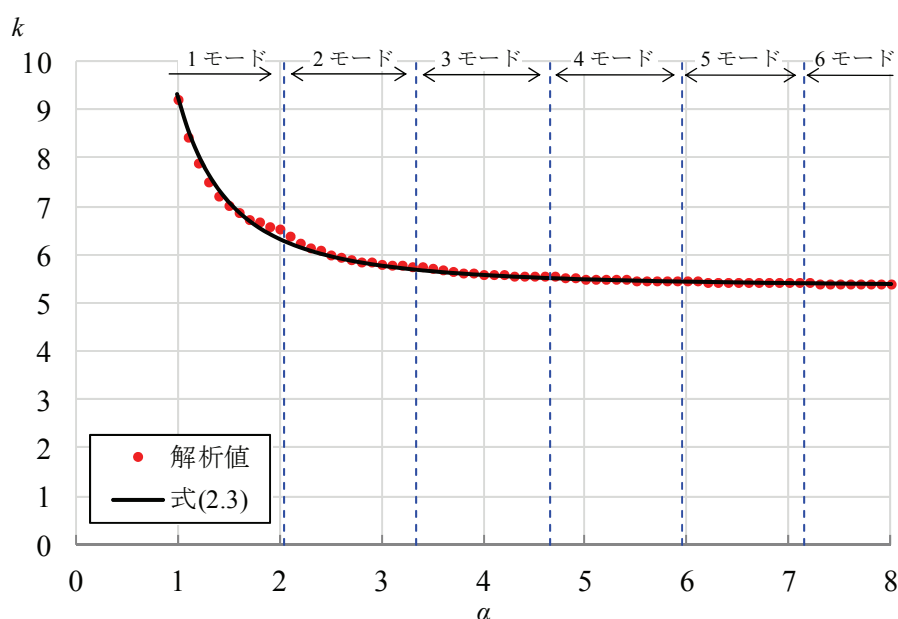
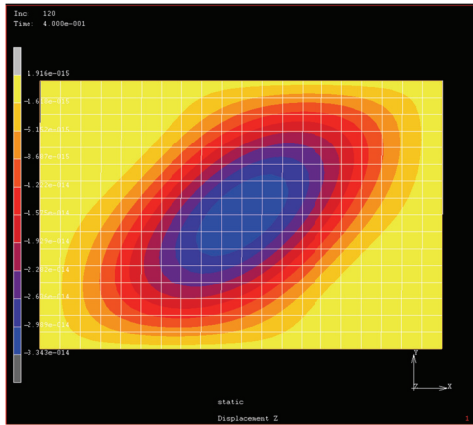


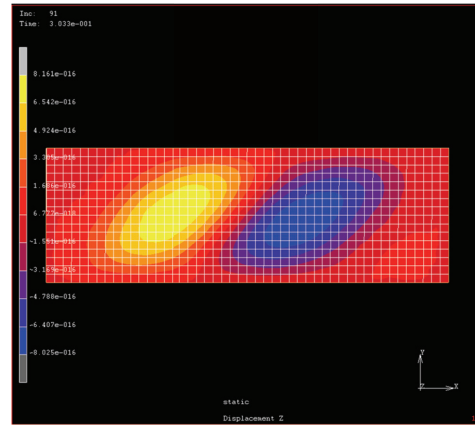
図-2.2 せん断座屈係数 k と縦横比 α の関係

図-2.2 に示す，鉛直の破線を境としてせん断座屈波形のモード数が変化する．各モードに対するせん断座屈波形の一例を図-2.3 に示す．表-2.1 の三つの境界条件は，全て図-2.3 と同じせん断座屈波形を示す．せん断座屈波形のモード数が変化する前後の縦横比 α の値とそれに対応するせん断座屈係数の値を表-2.5 に示す．同表から分かるように，縦横比 α が 2 以下では座屈波形のモード数は 1 である． α が 2.1 から 5.9 の範囲では， α が 1.2 増えるごとにモード数が 1 つ増える． α が 6 から 7.1 の範囲では 5 モードの座屈波形が生じる．

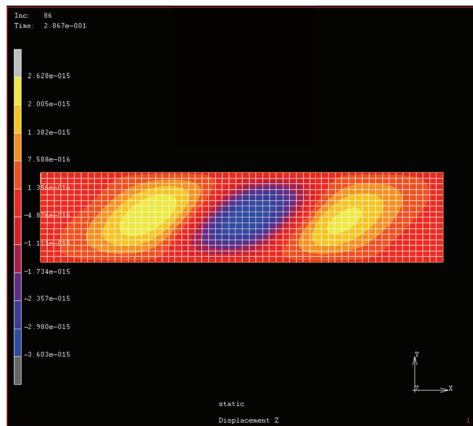
以上より，表-2.1 の三つの境界条件は，同じせん断座屈係数およびせん断座屈波形を与えるので，長方形板の面内方向にせん断変形を起こさせる境界条件として，表-2.1 の境界条件 A を採用する．



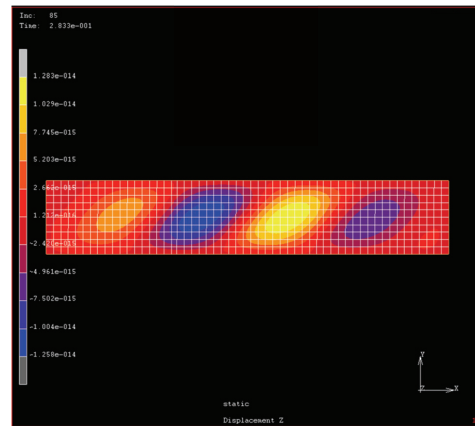
(a) 1 モード ($\alpha=1.5$)



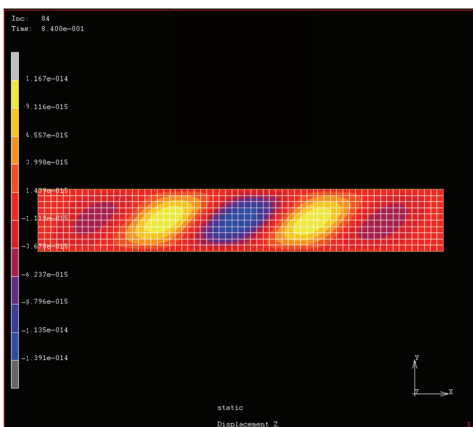
(b) 2 モード ($\alpha=3.0$)



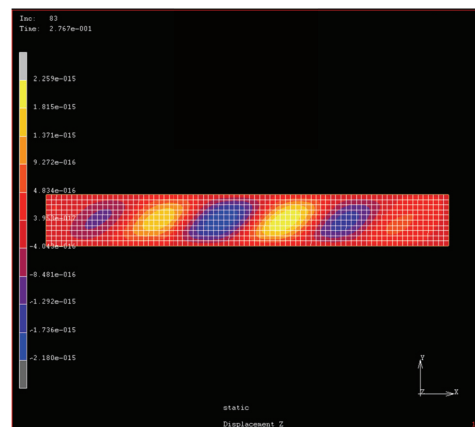
(c) 3 モード ($\alpha=4.0$)



(d) 4 モード ($\alpha=5.5$)



(e) 5 モード ($\alpha=6.5$)



(f) 6 モード ($\alpha=8.0$)

図-2.3 せん断座屈波形

表-2.5 せん断座屈波形のモード数が増える前後の縦横比の値と
それに対応するせん断座屈係数の値

モード数	α	k
1	2	6.519
2	2.1	6.391
	3.3	5.757
3	3.4	5.757
	4.6	5.561
4	4.7	5.561
	5.9	5.497
5	6	5.497
	7.1	5.432
6	7.2	5.432

第3章 弾塑性有限変位解析

3.1 応力—ひずみ関係

面内せん断を受けるアルミニウム合金板の耐荷力を算出するために、次式で与えられる応力—ひずみ関係を使用する¹⁸⁾。

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

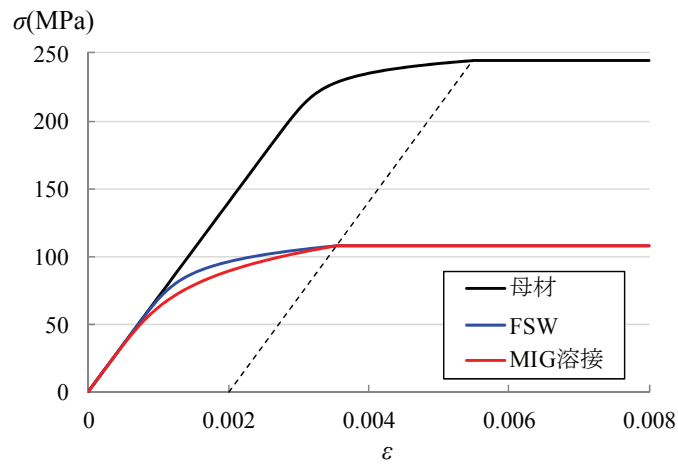
$$[\text{接合部}] \quad \begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{j0.2}} \right)^{n_j} & (\sigma \leq \sigma_{j0.2}) \\ \sigma = \sigma_{j0.2} & (\sigma > \sigma_{j0.2}) \end{cases} \quad (3.2)$$

ここに、
 ε と σ : それぞれひずみと応力
 E : ヤング率 (=70GPa)
 $\sigma_{0.2}$ と $\sigma_{j0.2}$: それぞれ母材と接合部の 0.2% 耐力
 n と n_j : それぞれ母材と接合部のひずみ硬化パラメータ

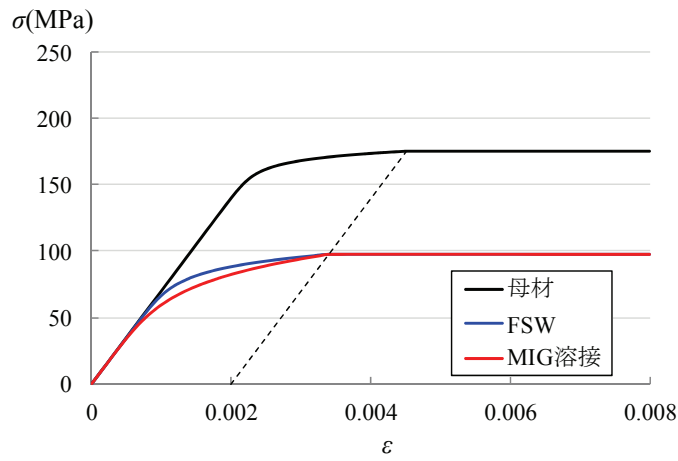
本研究では、6000 系アルミニウム合金 A6061-T6 と A6005C-T5、5000 系アルミニウム合金 A5083-O を扱う。これらのアルミニウム合金の 0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ と $\sigma_{j0.2}$ 、およびひずみ硬化パラメータ n と n_j の値を表-3.1 に示す。さらに式(3.1)と(3.2)が与える応力—ひずみ関係を図-3.1 に示す。母材と接合部の 0.2% 耐力に対して JAA 指針⁵⁾で規定される値を用いる。JAA 指針で規定される接合部の 0.2% 耐力は、MIG 溶接に対するものである。摩擦攪拌接合は MIG 溶接ほど入熱量が大きいので、摩擦攪拌接合部の 0.2% 耐力は MIG 溶接部の 0.2% 耐力より高いと考えられる。しかし十分なデータがないので、摩擦攪拌接合部の 0.2% 耐力に対して、JAA 指針で規定される MIG 溶接に対する値を採用する。

表-3.1 0.2%耐力とひずみ硬化パラメータの値

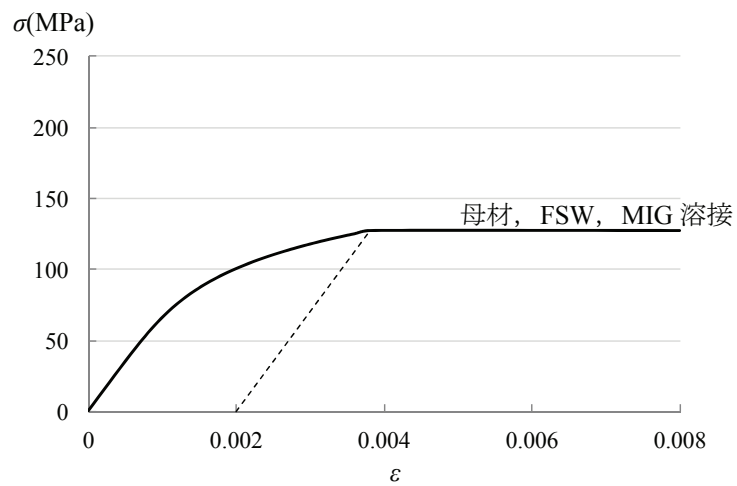
材料	母材		接合部			
			MIG 溶接		摩擦攪拌接合 (FSW)	
	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	n	$\sigma_{j0.2}$ (MPa)	n_j	$\sigma_{j0.2}$ (MPa)	n_j
A6061-T6	245	29.1	108	5.3	108	10
A6005C-T5	175	29.1	98	5.3	98	10
A5083-O	127	5.3	127	5.3	127	5.3



(a) A6061-T6



(b) A6005C-T5



(c) A5083-O

図-3.1 応力-ひずみ関係

3.2 接合位置と強度低下の範囲

アルミニウム長方形板の接合位置と強度低下の範囲を図-3.2に示す。

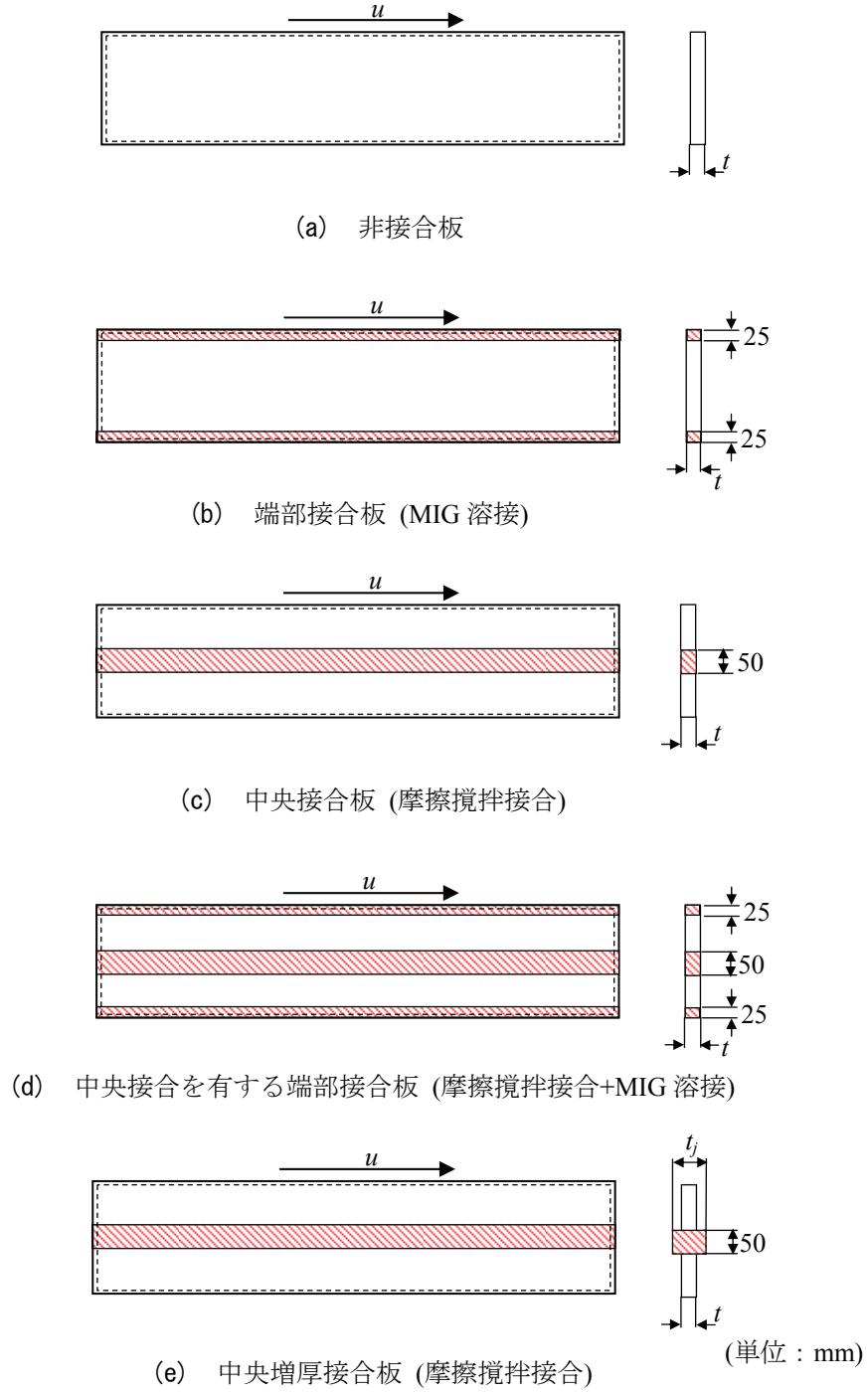


図-3.2 接合位置と強度低下の範囲

図-3.2(a)は、接合をもたない板、すなわち非接合板である。図-3.2(b)～(e)は接合板であり、各図の斜線は、6000系アルミニウム合金においては、摩擦攪拌接合またはMIG溶接によって強度低下が生じる範囲を示す。

図-3.2(b)は、板の両縁をMIG溶接で隅肉溶接する場合であり、強度低下が生じる範囲は板の各縁から25mmである^{6),18)}。これは、図-1.2(b)に示すアルミニウム合金桁において、桁高が低く、ウェブ内に摩擦攪拌接合を必要としない場合に対応する。

図-3.2(c)は、板の中央を摩擦攪拌接合で突合せ接合する場合であり、強度低下が生じる範囲は接合中心から各側25mm、計50mmである^{6),18)}。これは、図-1.2(a)に示すアルミニウム合金桁において、ウェブの中央に摩擦攪拌接合が存在する場合に対応する。

図-3.2(d)は、板の中央を摩擦攪拌接合で突合せ接合し、さらに板の両縁をMIG溶接で隅肉溶接する場合である。強度低下が生じる範囲は、板の各縁から25mmおよび板の中央に、接合中心から各側25mm、計50mmである。これは、図-1.2(b)のアルミニウム合金桁のウェブに対応する。

図-3.2(e)は、接合部の強度低下を補うために、強度低下を起こす範囲の板厚を厚くした接合板である。押出型材では、板の端を部分的に厚くすることは容易である。増厚部の板厚は次式で与えられる。

$$t_j = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{j0.2}} t \quad (3.3)$$

ここに、
 t と t_j : それぞれ母材の板厚と接合部の板厚
 $\sigma_{0.2}$: 母材の0.2%耐力
 $\sigma_{j0.2}$: 接合部の0.2%耐力

式(3.3)で与えられる板厚を接合部に与えることにより、0.2%耐力に関して、接合部の断面強度は母材のそれと同じになる。

3.3 初期たわみ

せん断を受ける長方形板に対して、次の二つの初期たわみを考慮する。

$$w_0 = w_{0\max} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (3.4)$$

$$w_0 = w_{0\max} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (3.5)$$

ここに、
 $w_{0\max}$: 最大初期たわみ
 m : 長方形板の長さ方向の初期たわみモード数
 n : 長方形板の板幅方向の初期たわみモード数 [式(3.1)で使用される母材のひずみ硬化パラメータ n とは異なることに注意]

式(3.4)では、 y 軸方向のモード数を1とし、 x 軸方向のモード数を変える。反対に、式(3.5)では、 x 軸方向のモード数を1として、 y 軸方向のモード数を変える。

3.4 残留応力

摩擦撹拌接合と MIG 溶接を用いて突合せ接合により製作された板に対して、接合線方向の残留応力は接合中心から各側 25mm（6000 系アルミニウム合金においては、接合による強度低下が生じる範囲と同じ）まで一様な引張残留応力、25mm より離れた位置で一様な圧縮残留応力となる矩形分布でモデル化され、引張残留応力の大きさは、最大で、接合部の 0.2% 耐力であることが明らかにされている¹⁸⁾。これを考慮して、接合板の残留応力分布に対する仮定を図-3.3 に示す。

図-3.3(a)の端部接合板の場合、各縁から 25mm の範囲が、 $\sigma_{rt}=\sigma_{j0.2}$ の引張残留応力であり、それから離れた位置では $\sigma_{rc}=50 \sigma_{j0.2} / (b-50)$ の圧縮残留応力である。ここで、 b は板幅であり、単位は mm である。

図-3.3(b)の中央接合板の場合、中央 50mm の範囲が、 $\sigma_{rt}=\sigma_{j0.2}$ の引張残留応力であり、それから離れた位置では $\sigma_{rc}=50 \sigma_{j0.2} / (b-50)$ の圧縮残留応力である。

図 3.3(c)の中央接合を有する端部接合板の場合、中央 50mm の範囲および各縁から 25mm の範囲が、 $\sigma_{rt}=\sigma_{j0.2}$ の引張残留応力であり、それから離れた位置では $\sigma_{rc}=100 \sigma_{j0.2} / (b-100)$ の圧縮残留応力である。

図-3.3(d)の中央増厚接合板の場合、中央 50mm の範囲が式(3.3)で与えられる板厚に増厚され、この範囲に $\sigma_{rt}=\sigma_{j0.2}$ の引張残留応力が発生するので、これに釣り合う圧縮残留応力は $\sigma_{rc}=50 \sigma_{j0.2} / (b-50)$ になる。

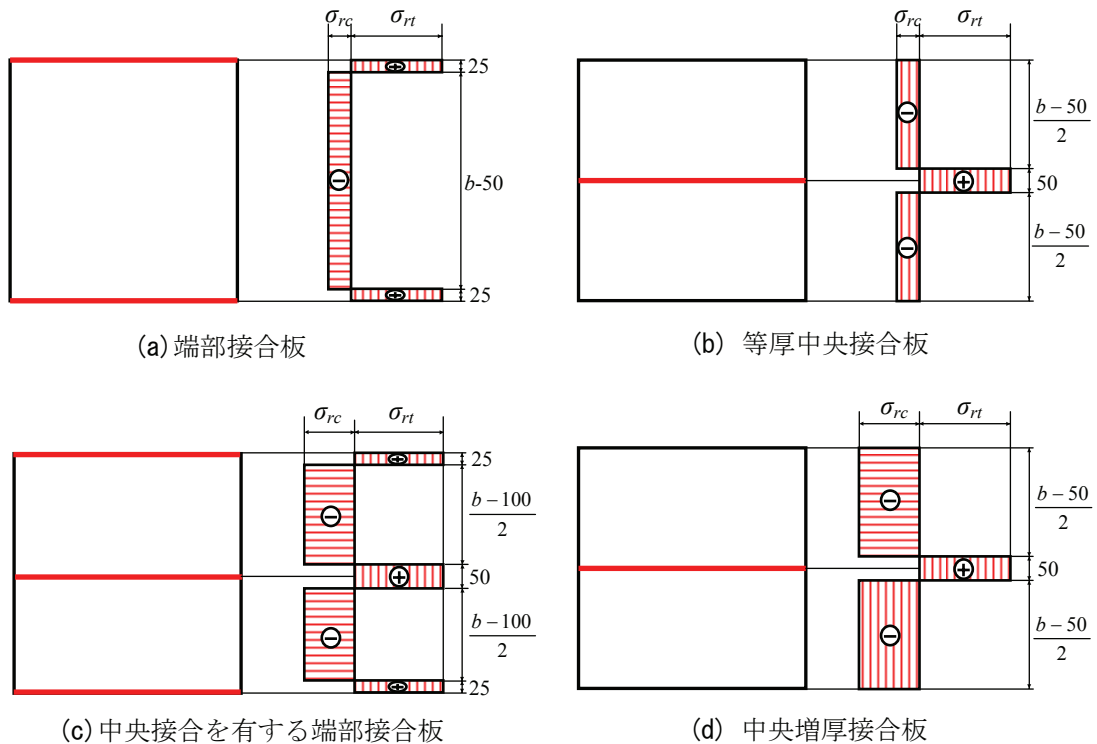


図-3.3 残留応力分布

3.5 境界条件

2章で、表-2.1に示す三種類の境界条件は、同じせん断座屈強度を与えることを示した。耐荷力に関しても、同表に示す三種類の境界条件が同じ値を与えるかどうかについて調べる。

表-2.1の境界条件A, B, Cに対するせん断耐荷力 $\tau_u/\tau_{0.2}$ の値を表-3.2に示す。これは、汎用有限要素解析プログラムMARCによる弾塑性有限変位解析の結果である。 τ_u は、長方形板の左右の辺上の節点に生じるy軸方向反力の合計を長方形板の断面積で除した平均せん断応力で、最大荷重に対する値である。 $\tau_{0.2}$ は次式で定義される母材の0.2%せん断耐力である。

$$\tau_{0.2} = \frac{\sigma_{0.2}}{\sqrt{3}} \quad (3.6)$$

表-3.2の結果を与える解析対象は、A6061-T6で、板幅 $b=400\text{mm}$ 、板厚 $t=5.11\text{mm}$ (幅厚比 $\beta=78.4$)の非接合板である。式(3.4)の初期たわみを有し、 $w_{0\text{max}}=b/250$ である。式(3.4)の長さ方向のモード数 m の値も表-3.2に示す。この値は、長方形板の縦横比 α に対応するせん断座屈波形のモード数である(図-2.2参照)。有限要素として8節点厚肉シェル要素(MARCにおける要素番号22)を用いる。各有限要素の形状は正方形で、 $\alpha=1$ の正方形板は板幅方向に10分割、 $\alpha=3$ と5の長方形板は板幅方向に8分割している。要素分割数と耐荷力の精度の関係については次節で述べる。表-3.2から分かるように、各境界条件に対して $\tau_u/\tau_{0.2}$ の値は、数値計算上の誤差と考えられる範囲で同じである。

表-3.2 各境界条件に対する $\tau_u/\tau_{0.2}$ の値

α	m	境界条件			
		A	B	C	
				$u=v=d$	$u=d$ $v=\alpha d$
1	1	0.735	0.736	0.735	0.735
3	2	0.618	0.617	0.617	0.617
5	4	0.601	0.600	0.601	0.600

表-3.2の最大荷重時に対する、式(2.2)で定義されるせん断変形角 θ の値を表-3.3に示す。同表から分かるように、各境界条件に対する θ の値は数値計算上の誤差と考えられる範囲で同じである。したがって、長方形板の面内方向にせん断変形を起こさせる境界条件A, B, Cによらず、式(2.2)で定義されるせん断変形角 θ の値は、最大荷重時に同じ値をとる。

以上より、弾塑性有限変位解析によって長方形板のせん断耐荷力を算出する場合も表-2.1の境界条件Aを採用する。

表-3.3 各境界条件に対する最大荷重時のせん断変形角 θ の値

α	m	境界条件			
		A($\times 10^{-3}$)	B($\times 10^{-3}$)	C($\times 10^{-3}$)	
				$u=v=d$	$u=d$ $v=ad$
1	1	4.633	4.633	4.633	4.633
3	2	4.750	4.750	4.756	4.767
5	4	5.225	5.200	5.220	5.200

3.6 要素分割数

非接合板のせん断耐荷力 $\tau_u/\tau_{0.2}$ と板幅方向の要素分割数の関係を表-3.4 に示す。有限要素の形状は正方形である。解析対象は、A6061-T6 で、板幅 $b=400\text{mm}$ の非接合板であり、式(3.4)の初期たわみを有し、 $w_{0\text{max}}=b/250$ である。長方形板の縦横比 α に対応するせん断座屈波形のモード数を式(3.4)の m に与える (図-2.2 参照)。表中の R は、次式で定義される幅厚比パラメータである。

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\tau_{0.2}}{E}} \beta \quad (3.7)$$

式(3.7)の k は、式(2.3)で与えられるせん断座屈係数である。

表-3.4 から分かるように、 $\alpha=1.0$ の場合、 $R=0.5$ と 1.0 では、板幅方向の要素分割数は 8 分割で十分であるが、 $R=1.6$ では、板幅方向の要素分割数に対して 10 分割必要である。 $\alpha=2.0, 3.0, 6.5$ の各場合、 R のどの値に対しても、板幅方向の要素分割数は 8 分割で十分である。したがって、 R の値に係らず、板幅方向の要素分割数を、 $1.0\sim 1.9$ の α に対して 10 分割、 2.0 以上の α に対して 8 分割とする。

表-3.4 非接合板のせん断耐荷力 $\tau_u/\tau_{0.2}$ と板幅方向の要素分割数の関係

(a) $\alpha=1.0$ ($m=1$)

R	板幅方向の要素分割数			
	8分割	10分割	20分割	30分割
0.5	0.995	0.995	0.995	0.995
1.0	0.835	0.833	0.832	0.833
1.6	0.614	0.607	0.602	0.602

(b) $\alpha=2.0$ ($m=1$)

R	板幅方向の要素分割数			
	8分割	10分割	20分割	30分割
0.5	0.998	0.998	0.998	0.998
1.0	0.869	0.869	0.869	0.869
1.6	0.609	0.609	0.609	0.609

(c) $\alpha=3.0$ ($m=2$)

R	板幅方向の要素分割数			
	8分割	10分割	20分割	30分割
0.5	0.997	0.997	0.997	0.997
1.0	0.855	0.855	0.855	0.855
1.6	0.601	0.600	0.599	0.600

(d) $\alpha=6.5$ ($m=5$)

R	板幅方向の要素分割数			
	8分割	10分割	20分割	30分割
0.5	0.997	0.997	0.997	0.997
1.0	0.857	0.858	0.858	0.858
1.6	0.594	0.595	0.595	0.595

3.2節で述べたように、6000系アルミニウム合金の場合、接合中心から各側25mmの範囲が強度低下を起こす。この強度低下を起こす部分に必要な要素分割数を次に調べる。

せん断耐荷力 $\tau_u/\tau_{j0.2}$ と板幅方向の要素分割数の関係を表-3.5に示す。ここで、 $\tau_{j0.2}$ は、次式で定義される接合部の0.2%せん断耐力である。

$$\tau_{j0.2} = \frac{\sigma_{j0.2}}{\sqrt{3}} \quad (3.8)$$

さらに表-3.5の R_j は、次式で定義される幅厚比パラメータである。

$$R_j = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\tau_{j0.2}}{E}} \beta \quad (3.9)$$

式(3.9)の k は、式(2.3)で与えられるせん断座屈係数である。

表-3.5の解析対象は、A6061-T6で、板幅 $b=400\text{mm}$ の端部接合板であり、式(3.4)の初期たわみを有し、 $w_{0\text{max}}=b/250$ である。長方形板の縦横比 α に対応するせん断座屈波形のモード数を式(3.4)の m に与える(図-2.2参照)。さらに、図-3.3(b)に示す端部接合板の残留応力を考慮する。

25mmの接合部の板幅方向の要素分割は、16分割、32分割、48分割に対して、それぞれ1要素、2要素、3要素になる。有限要素の形状は正方形である。表-3.5から分かるように、 $\alpha=1.0$ の場合、 $R_j=0.6$ と 1.0 では、接合部の板幅方向の要素分割数は1要素で十分であるが、 $R_j=1.6$ では、接合部の板幅方向の要素分割数に対して2要素が必要である。 $\alpha=2.0, 3.0, 6.5$ の各場合、 R_j のどの値に対しても、接合部の板幅方向の要素分割数は1要素で十分である。したがって、 R_j の値に係らず、接合部の板幅方向の要素分割数を、 $1.0\sim 1.9$ の α に対して2要素、 2.0 以上の α に対して1要素とする。

表-3.5 接合板のせん断耐荷力 $\tau_u/\tau_{j0.2}$ と板幅方向の要素分割数の関係

(a) $\alpha=1.0$ ($m=1$)

R_j	板幅方向の要素分割数(接合部の要素数)		
	16分割(1要素)	32分割(2要素)	48分割(3要素)
0.5	1.000	1.000	1.000
1.0	0.978	0.974	0.973
1.6	0.675	0.668	0.667

(b) $\alpha=2.0$ ($m=1$)

R_j	板幅方向の要素分割数(接合部の要素数)		
	16分割(1要素)	32分割(2要素)	48分割(3要素)
0.5	1.000	1.000	1.000
1.0	0.982	0.981	0.980
1.6	0.683	0.683	0.681

(c) $\alpha=6.5$ ($m=5$)

R_j	板幅方向の要素分割数(接合部の要素数)		
	16分割(1要素)	32分割(2要素)	48分割(3要素)
0.5	1.000	1.000	1.000
1.0	0.962	0.962	0.961
1.6	0.711	0.711	0.709

第4章 後座屈強度の発生現象

4.1 後座屈強度

面内せん断応力を受ける長方形板には、斜め張力場の形成により、後座屈強度が発生する。この後座屈強度は、長方形板にせん断変形を起こさせる境界条件に依存して異なる。そこで、表-2.1の境界条件 A に対して生じる後座屈強度について調べる。解析対象は、A6061-T6 で、縦横比が $\alpha=6.5$ の非接合板である。式(3.4)の初期たわみを考慮し、最大初期たわみは $w_{0max}=b/250$ である。縦横比 $\alpha=6.5$ に対する座屈モード数 5 (図-2.2 参照) を式(3.4)の m に使用する。長方形板の幅厚比パラメータ R に対して、0.5 と 1.6 を考慮する。 $R=0.5$ の長方形板には、板厚が厚いので後座屈強度が発生することなく、板全体が塑性化することによって最高荷重に達する。しかし、後座屈強度が発生する $R=1.6$ の長方形板の挙動と対比するために、 $R=0.5$ の長方形板に対しても計算を行う。

4.2 $R=0.5$ の長方形板

最大荷重時の変形を図-4.1 に示す。面内方向の変位を 30 倍に拡大している。図中の長方形板の色は、付加面外変位を表す等高線である。付加面外変位は、図-2.3(e) に示す座屈波形に類似する形状を呈している。最大付加面外変位は、長方形板の中央で $w/b=1/862$ である。長方形板の各辺は、面内方向に曲げ変形を起こしてない。

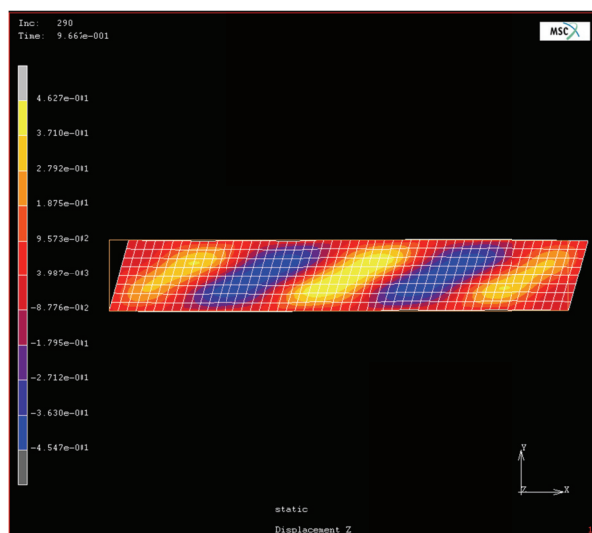


図-4.1 $R=0.5$ の長方形板の変形

長方形板の中央面における最大荷重時の Mises 応力を図-4.2 に示す。Mises 応力は、A6061-T6 の 0.2%耐力 245MPa に達し、長方形板のほぼ全域が塑性化している。

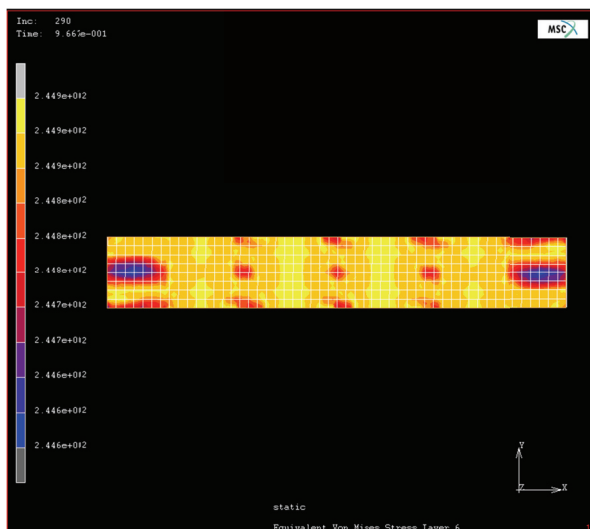


図-4.2 R=0.5 の長方形板の Mises 応力(中央面)

最大荷重時の上辺 $y=b$ と左辺 $x=0$ のせん断応力分布を図-4.3 に示す。これは長方形板の中央面に生じるものである。せん断応力は A6061-T6 の 0.2%せん断耐力 $\tau_{0.2}=141.45\text{MPa}$ に達し、一様に分布している。

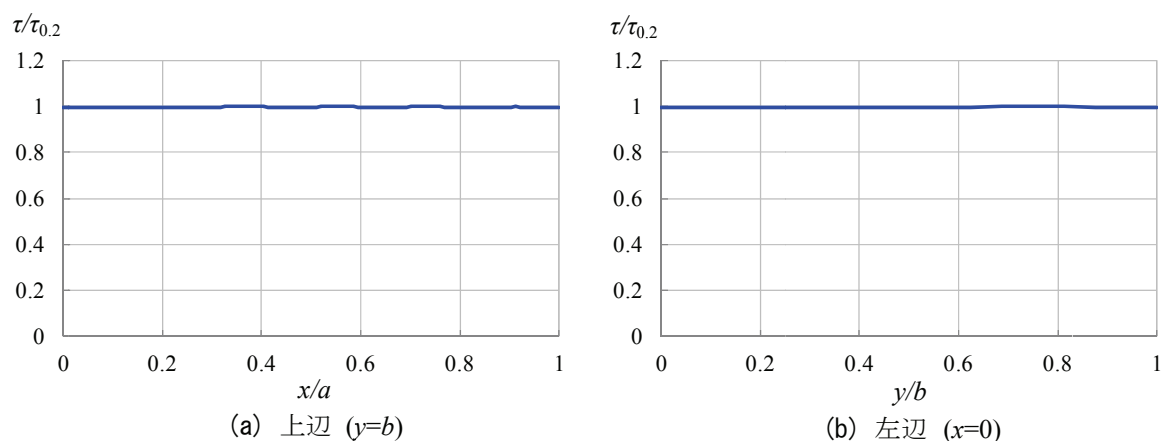


図-4.3 R=0.5 の長方形板の辺上のせん断応力分布 (中央面)

4.3 $R=1.6$ の長方形板

最大荷重時の変形を図-4.4に示す。面内方向の変位を30倍に拡大している。図中の長方形板の色は、面外変位を表す等高線である。最大付加面外変位は、長方形板の中央で $w/b=1/27$ であり、 $R=0.5$ の長方形板に比べて大きく面外変形している。面外変形の斜めの峰が、 $R=0.5$ の長方形板のそれよりさらに水平方向に倒れている。長方形板の各辺は、面内方向に曲げ変形を起こしている。

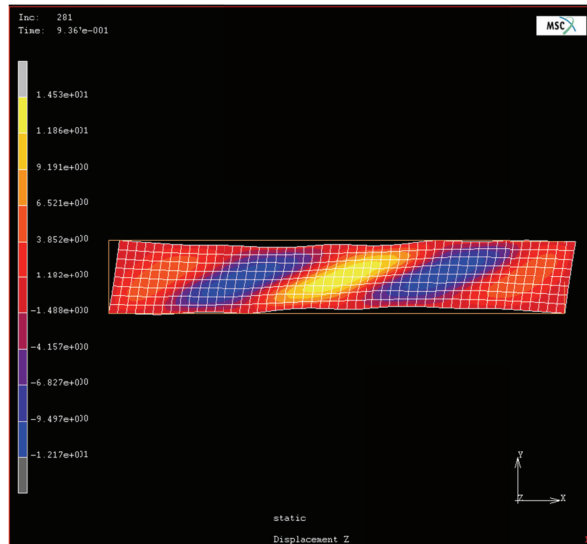
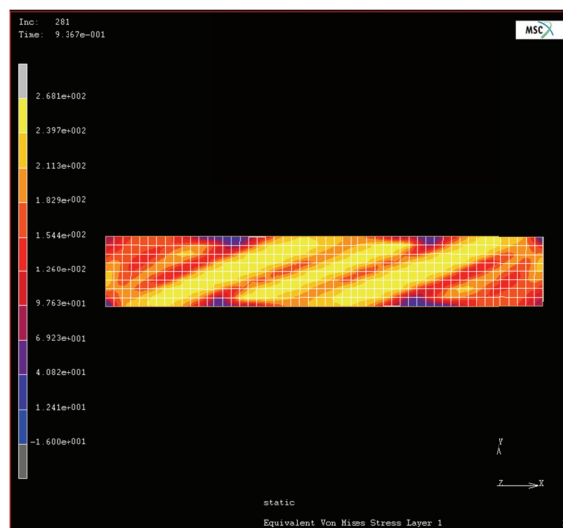
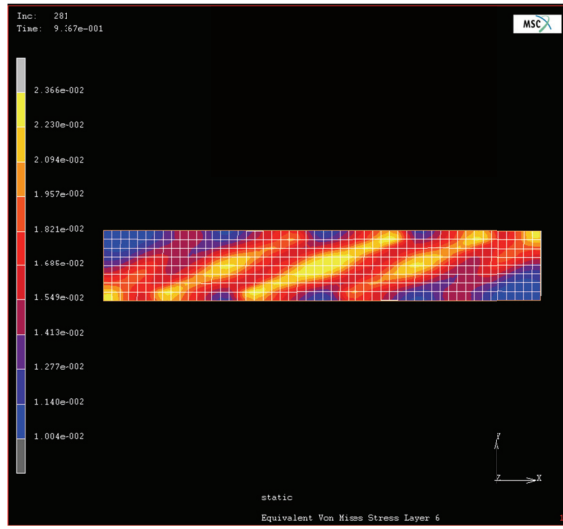


図-4.4 $R=1.6$ の長方形板の変形

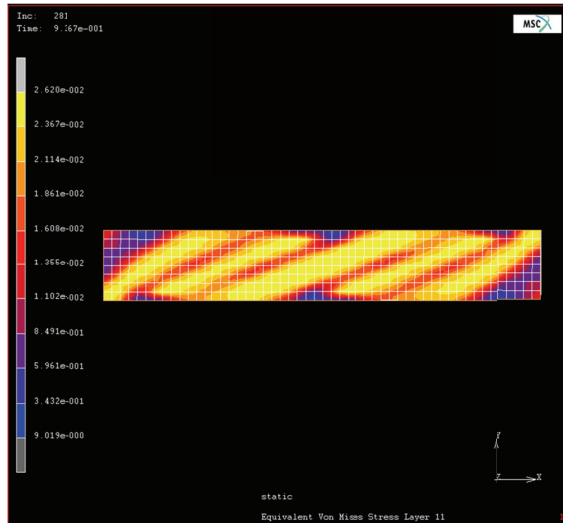
長方形板の上面、中央面、下面に生じる Mises 応力を図-4.5に示す。斜め張力場が形成されていることが分かる。上面と下面の Mises 応力は、0.2%耐力 245MPa に達しているが、中央面の Mises 応力は 0.2%耐力に達していない。



(a) 上面



(b) 中央面



(c) 下面

図-4.5 $R=1.6$ の長方形板の Mises 応力

最大荷重時の上辺 $y=b$ と左辺 $x=0$ のせん断応力分布を図-4.6 に示す。これは長方形板の中央面に生じるものである。せん断応力は波状に分布し、上辺と下辺、左辺と右辺の分布形状はそれぞれ逆対称となる。図-4.6(a)の分布の極大値は、図-4.4 に示す面外変形において、 $y=b$ で、斜めの波形の峰が消滅する位置に対応する。

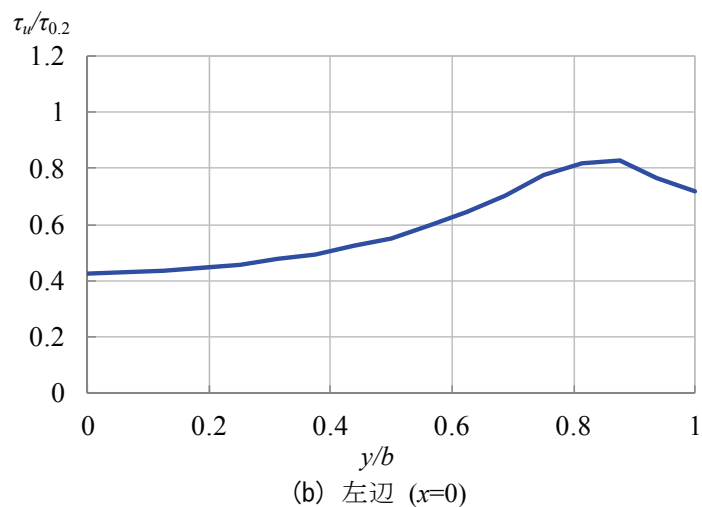
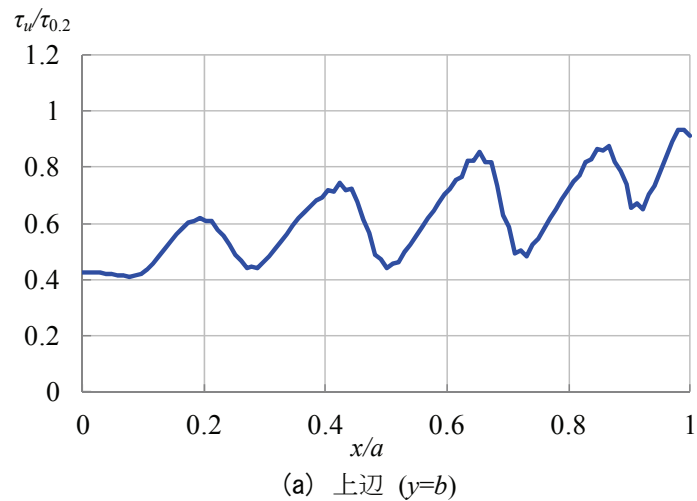


図-4.6 $R=1.6$ の長方形板の辺上のせん断応力分布 (中央面)

x 軸方向および y 軸方向に切断された長方形板の力の釣り合いを図-4.7 に示す. これは長方形板の中央面に生じるものである. 図-4.7 (a) に示すように, x 軸方向には, 上辺と下辺のせん断応力の積分の差が, 垂直応力 σ_x の積分と等しくなる. 図-4.7 (b) に示すように, y 軸方向には, 左辺と右辺のせん断応力の積分の差が, 垂直応力 σ_y の積分と等しくなる. 長方形板の各辺の長さ方向に対して直角方向の面内変位は自由としているので, 各辺に垂直応力は発生しない.

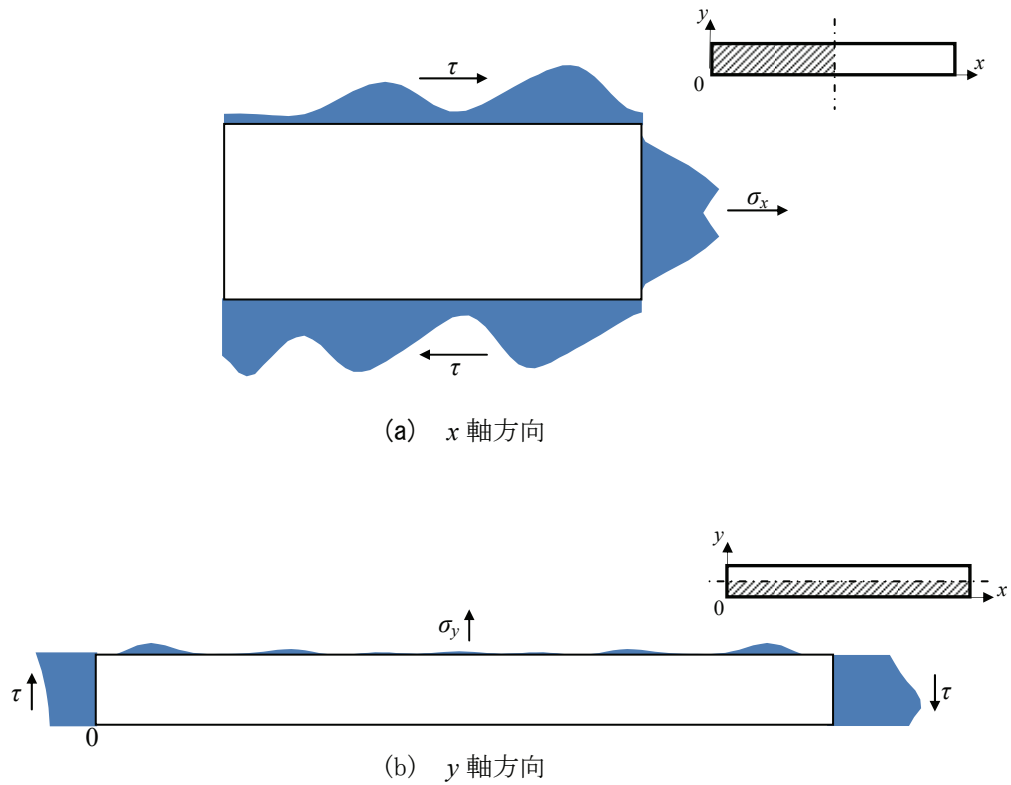


図-4.7 $R=1.6$ の長方形板の最大荷重時の力の釣り合い (中央面)

第5章 6000系アルミニウム合金板のせん断耐荷力

5.1 初期たわみ波形がせん断耐荷力に与える影響

押出型材を摩擦攪拌接合によって突合せ接合することによって製作された突起付きアルミニウム合金パネルの初期たわみが計測されている（付録A参照）。初期たわみ形状は、摩擦攪拌接合の方向、すなわち板の長手方向はサインの1波が卓越し、摩擦攪拌接合の方向に対して直角な方向、すなわち板幅方向はサインの1波と3波が卓越している。次に、初期たわみ形状が長方形板のせん断耐荷力に与える影響について調べる。

解析対象は、A6061-T6で、縦横比が $\alpha=6.5$ の非接合板である。 x 軸方向（板の長手方向）の初期たわみ形状がせん断耐荷力に与える影響を図-5.1に示す。これは、初期たわみを与える式(3.4)において $m=1$ と5に対する結果である（ $m=5$ に対するFEM解析値は付録B-1参照）。 $m=1$ は、実際のパネルに生じる初期たわみの卓越波数であり、 $m=5$ は、縦横比が $\alpha=6.5$ に対応する座屈モード数（図-2.2参照）である。最大初期たわみは、両者とも $w_{0max}=b/250$ である。図から分かるように、 R が0.7から1.1の範囲で、 $m=5$ に対するせん断耐荷力が $m=1$ に対するそれより幾分低下する。

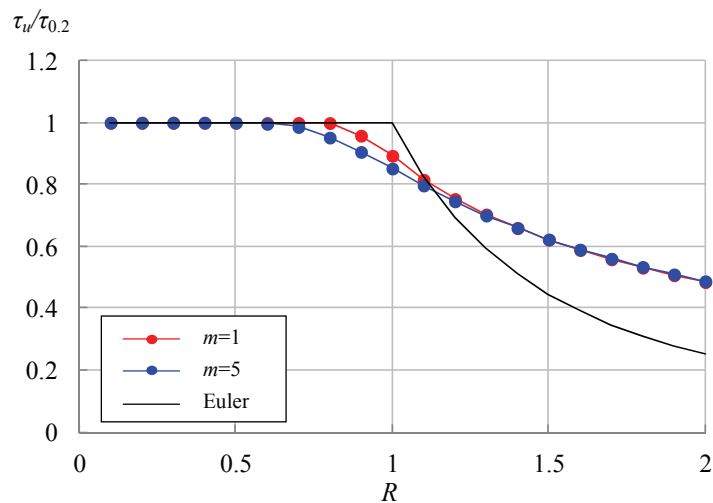


図-5.1 x 軸方向の初期たわみ形状がせん断耐荷力に与える影響

幅厚比パラメータ $R=0.5, 1.0, 1.6$ に対する荷重と付加面外変位の関係を図-5.2に示す。 w は板の中心($a/2, b/2$)の付加面外変位であり、板幅 b で無次元化されている。

図-5.2(a)と(b)に示すように、 $R=0.5$ と 1.0 の場合、 $m=1$ の初期たわみに対する w/b は、最大荷重に達するまでほとんど増加しないが、 $m=5$ の初期たわみに対する w/b は、荷重の増加に従って増加し、最大荷重に達する。他方、図-5.2(c)に示すように、 $R=1.6$ の場合、 $m=1$ の初期たわみに対して、 $\tau/\tau_{0.2}$ が約0.39に達すると、 w/b が急激に増加し、 $m=5$ の初期たわみに対する付加面外変位に近づく。ここで、 $\tau/\tau_{0.2}=0.39$ は、 $R=1.6$ の長方形板のせん断座屈強度に相当する。

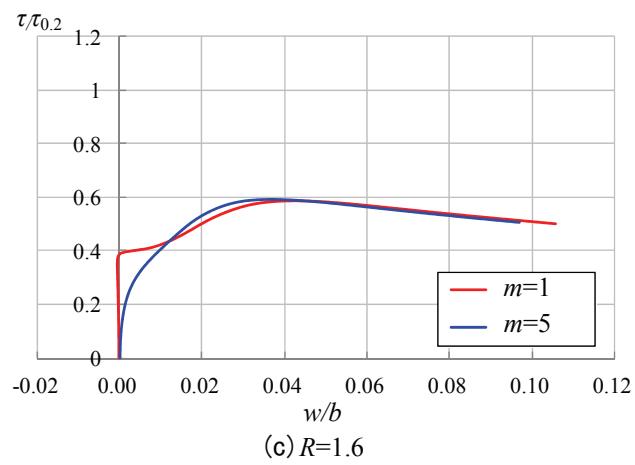
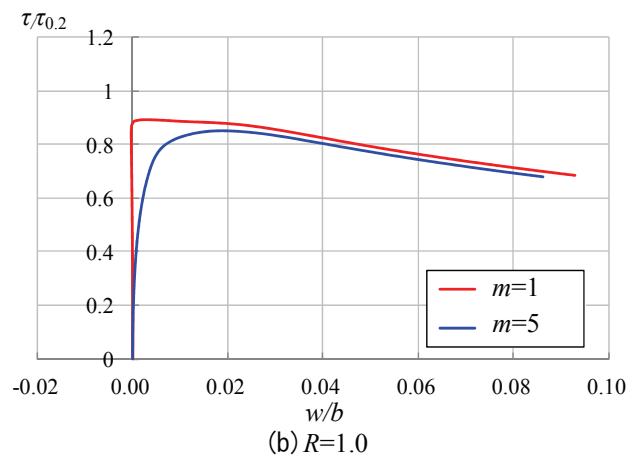
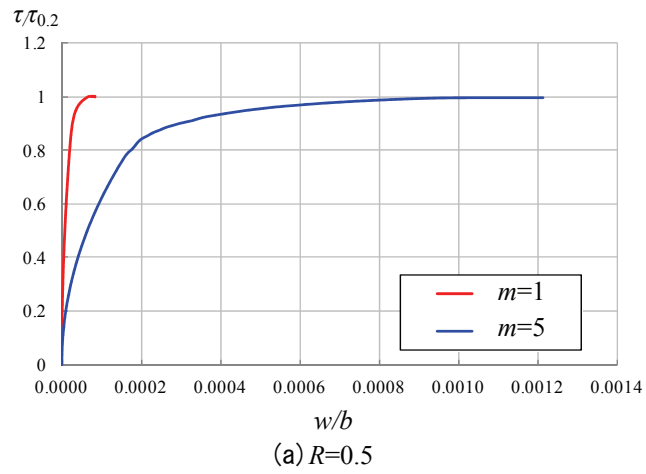


図-5.2 荷重と付加面外変位の関係

最大荷重時の面外変形を表-5.1に示す。板の中心($a/2$, $b/2$)の付加面外変位 w/b の値も併記してある。 $R=0.5$ の場合、 $m=1$ に対しては斜めの波形が現れず、 w/b の値も $m=5$ のそれよりかなり小さい。 $R=1.0$ の場合、 $m=1$ と 5 に対して同様の面外変位が生じるが、 $m=1$ に対する w/b の値は $m=5$ に対するそれよりかなり小さい。 $R=1.6$ の場合、 $m=1$ と 5 に対して同様の面外変位が生じ、両者の w/b の値もお互いに近い。

表-5.1 最大荷重時の面外変形

	$m=1$	$m=5$
$R=0.5$		
$R=1.0$		
$R=1.6$		

y 軸方向（板幅方向）の初期たわみ波形がせん断耐荷力に与える影響を図-5.3 に示す。図から分かるように、 $n=1$ から 4 に対する初期たわみ波形に対してせん断耐荷力は一致する。したがって板幅方向の初期たわみ波形がせん断耐荷力に与える影響はない。

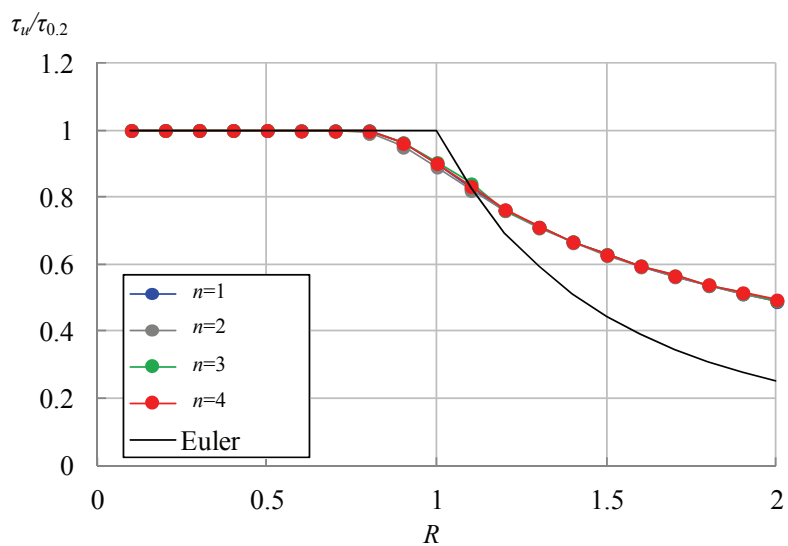
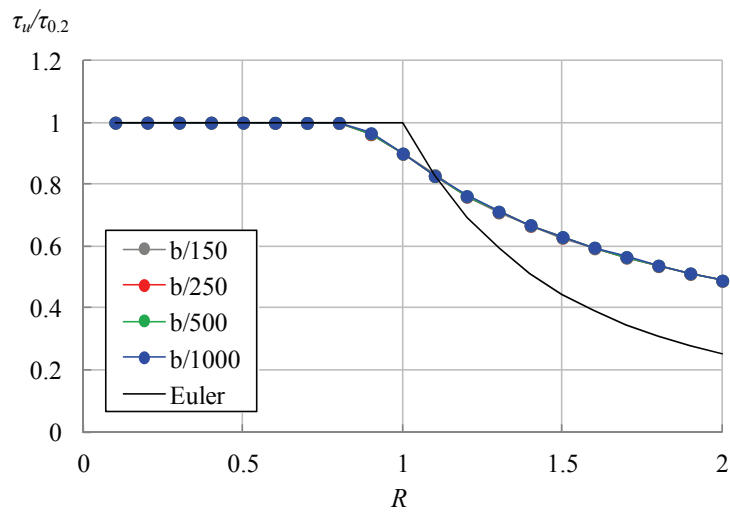


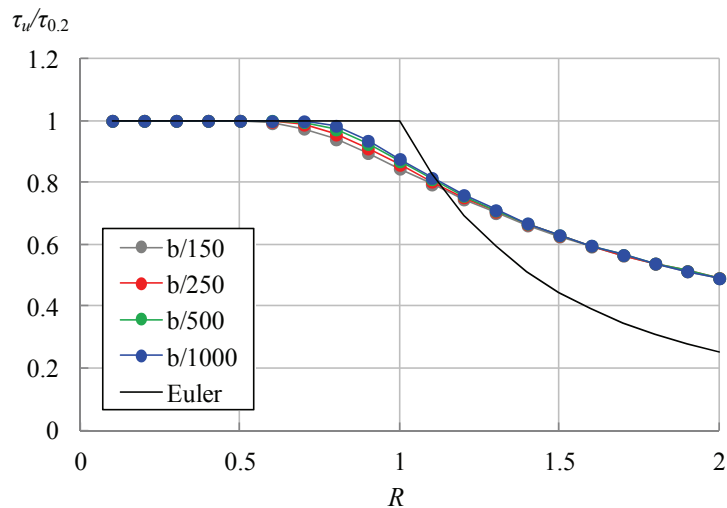
図-5.3 y 軸方向の初期たわみ波形がせん断耐荷力に与える影響

5.2 最大初期たわみがせん断耐荷力に与える影響

最大初期たわみの大きさがアルミニウム長方形板のせん断耐荷力に与える影響を図-5.4 に示す。解析対象は、A6061-T6 で、縦横比が $\alpha=6.5$ の非接合板である。図-5.4(a)と(b)は、式(3.4)の初期たわみに対して、それぞれ $m=1$ と 5 に対する結果である。最大初期たわみ w_{0max} に対して、 $b/150$, $b/250$, $b/500$, $b/1000$ を考慮する。図-5.4(a)から分かるように、 $m=1$ の初期たわみに対して、最大初期たわみが耐荷力に与える影響はほとんどない。他方、図-5.4(b)から分かるように、 $m=5$ の初期たわみに対して、 $R=0.6$ から $R=1.1$ の範囲で、最大初期たわみが大きくなると耐荷力がわずかに低下する。



(a) $m=1$

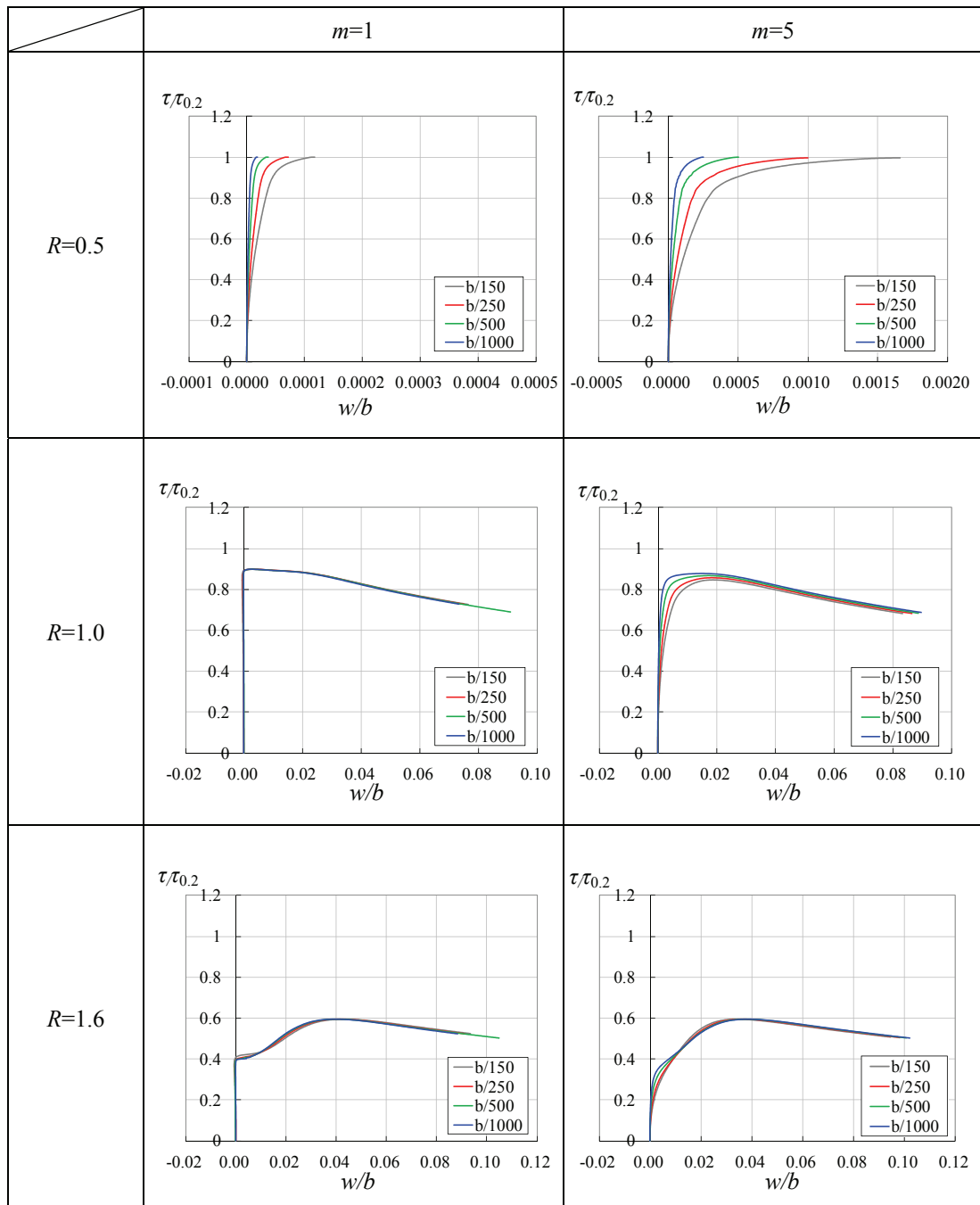


(b) $m=5$

図-5.4 最大初期たわみがせん断耐荷力に与える影響

荷重と付加面外変位の関係を表-5.2 に示す。 w は板の中心($a/2, b/2$)の付加面外変位である。
 $R=0.5$ の場合、最大初期たわみの大きさによって付加面外変位は異なるが、耐荷力はいずれも0.2%せん断耐力に達する。 $R=1.0$ の場合、 $m=1$ では、最大初期たわみの大きさによって付加面外変位は変わらないが、 $m=5$ では、最大初期たわみが大きくなると付加面外変位が大きくなり、耐荷力が少しずつ低下する。 $R=1.6$ の場合、 $m=1$ と5の両者において、最大初期たわみの大きさが付加面外変位に与える影響はほとんどない。

表-5.2 荷重と付加面外変位の関係



5.3 接合部の強度低下と残留応力がせん断耐荷力に与える影響

図-3.2 に示す接合板の接合部の強度低下がせん断耐荷力に与える影響を評価するために、次の二つの強度低下評価モデルを設定する。

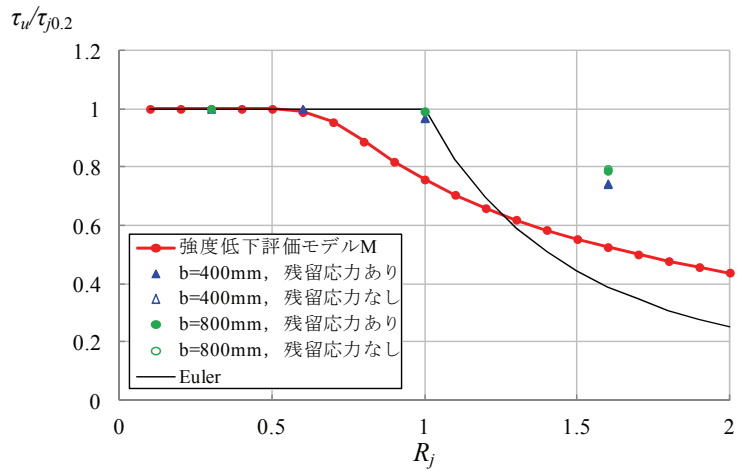
強度低下評価モデル M： MIG 溶接部の応力-ひずみ関係を長方形板の全領域に適用したモデル。

強度低下評価モデル F： 摩擦攪拌接合部の応力-ひずみ関係を長方形板の全領域に適用したモデル。

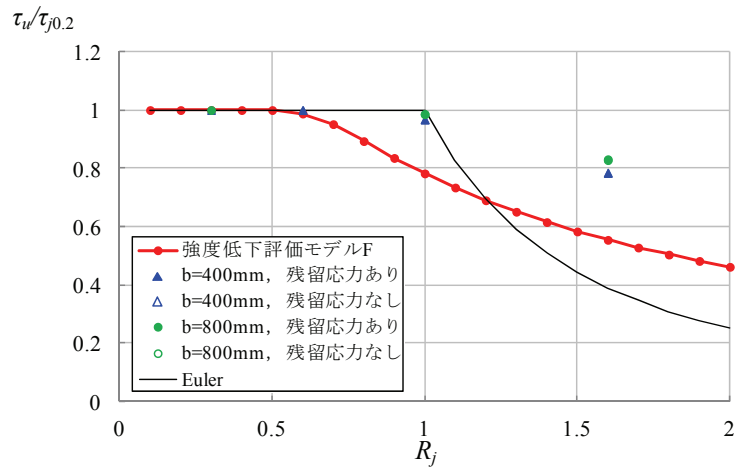
解析対象は、A6061-T6 で、縦横比が $\alpha=6.5$ の端部接合板、中央接合板、中央接合を有する端部接合板である。初期たわみに対して式(3.4)を考慮し、 $w_{0\max}=b/250$ である。 $\alpha=6.5$ に対する座屈モード数 5 (図-2.2 参照) を式(3.4)の m に用いる。各接合板の板幅に対して、 $b=400\text{mm}$ と 800mm を考慮する。残留応力の有無を考慮し、残留応力を考慮する場合には、3.4 節の残留応力を各接合板に与える。

端部接合板、中央接合板、中央接合を有する端部接合板、さらに強度低下評価モデル M と F に対する $\tau_u/\tau_{0.2}-R_f$ 関係を図-5.5 に示す (強度低下評価モデル M と F に対する FEM 解析値は付録 B-1 参照)。各図から分かるように、板幅 b が 400mm と 800mm に対する $\tau_u/\tau_{0.2}$ の上限はともに 1 である。すなわち、接合を有する長方形板のせん断耐荷力の上限は、接合部の 0.2%せん断耐力 $\tau_{0.2}$ である。長方形板の板幅が小さくなるに従って、板幅に対して、接合部の幅が相対的に大きくなるので、板幅が小さい長方形板のせん断耐荷力は、板幅が大きい長方形板のそれより低下し、強度低下評価モデル M または F の計算結果に近づく。各接合板に対して強度低下評価モデル M または F の耐荷力が下限値を与える。

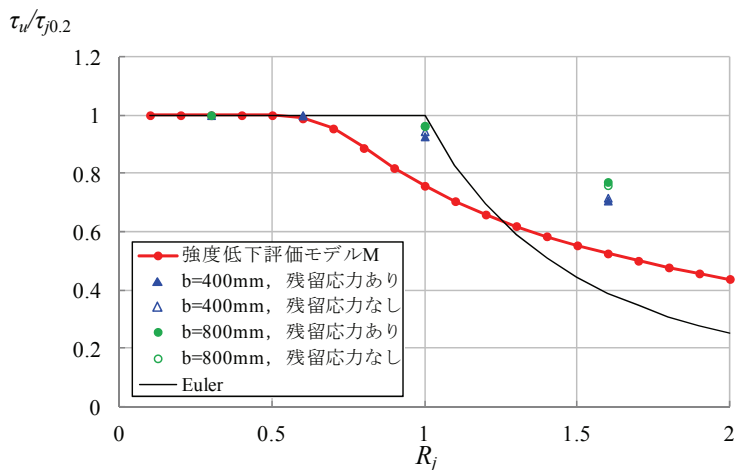
他方、板幅 $b=400\text{mm}$ の中央接合を有する端部接合板の $R_f=1$ に対して、残留応力がせん断耐荷力を幾分低下させるが、この場合を除いて残留応力がせん断耐荷力に及ぼす影響はほとんどない。これは、表-5.3 に示すように (同表には 5.4 節で述べる中央増厚接合板に対する値も示してある)、板幅 $b=400\text{mm}$ の中央接合を有する端部接合板は、他の場合と比較して、引張残留応力と自己平衡を取る圧縮残留応力が大きくなるためであると考えられる。



(a) 端部接合板(MIG 溶接)



(b) 中央接合板(摩擦攪拌接合)



(c) 中央接合を有する端部接合板(摩擦攪拌接合+MIG 溶接)

図-5.5 接合部の強度低下がせん断耐荷力に与える影響

表-5.3 A6061-T6 の接合板の圧縮残留応力の値

	板幅 b (mm)	$\sigma_{rc}/\sigma_{0.2}$
端部接合板	400	0.063
	800	0.029
中央接合板	400	0.063
	800	0.029
中央接合を有する端部接合板	400	0.147
	800	0.063
中央増厚接合板	400	0.143
	800	0.067

強度低下評価モデル M と F に対するせん断耐荷力と非接合板のそれとの比較を図-5.6 に示す。縦軸のせん断耐荷力 τ_u は母材の 0.2%せん断耐力 $\tau_{0.2}$ で無次元化され、横軸に幅厚比 β が採られている。図から分かるように、強度低下評価モデル M と F に対するせん断耐荷力は、非接合板のそれに比べて大幅に低下し、その上限値は、母材の 0.2%耐力に対する接合部の 0.2%耐力の比、すなわち $\sigma_{j0.2}/\sigma_{0.2}=0.44$ である。強度低下評価モデル M と F に対するせん断耐荷力の相違は、非接合板のせん断耐荷力と比較して相対的に無視できるほど小さい。

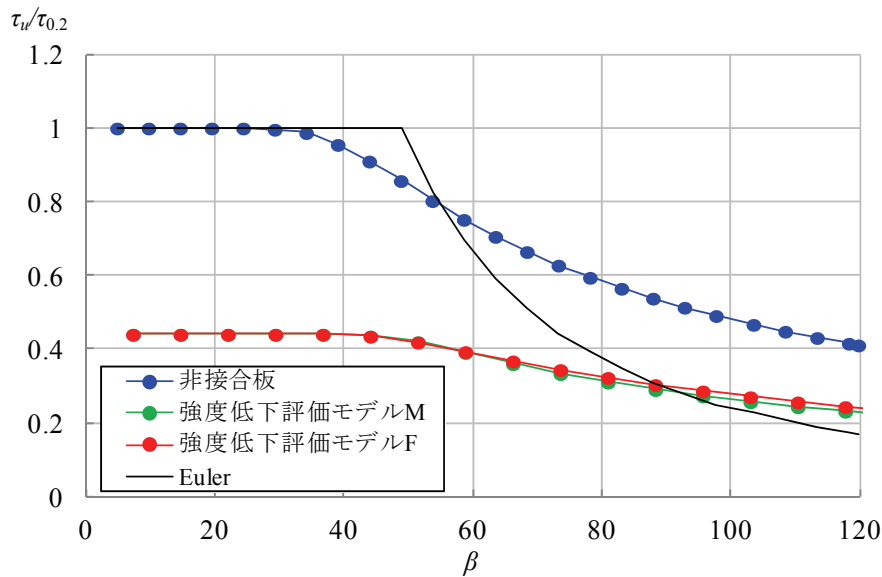


図-5.6 強度低下評価モデル M と F に対するせん断耐荷力と非接合板のそれとの比較

5.4 中央増厚接合板のせん断耐荷力

A6061-T6の中央増厚接合板の $\tau_u/\tau_{0.2}-R$ 関係を図-5.7に示す。縦横比が $\alpha=6.5$ であり、初期たわみに対して式(3.4)を考慮し、 $w_{0\max}=b/250$ である。縦横比 $\alpha=6.5$ に対する座屈モード数5(図-2.2参照)を式(3.4)の m に使用する。式(3.3)で与えられる板厚を接合部に与える。残留応力は考慮していない。図から分かるように、増厚接合板のせん断耐荷力は、非接合板のそれより増加し、板幅が大きくなるに従って、せん断耐荷力が非接合板のそれに近づく。これは、板幅が大きくなるに従って、板幅に対する増厚部の幅が相対的に小さくなるからである。

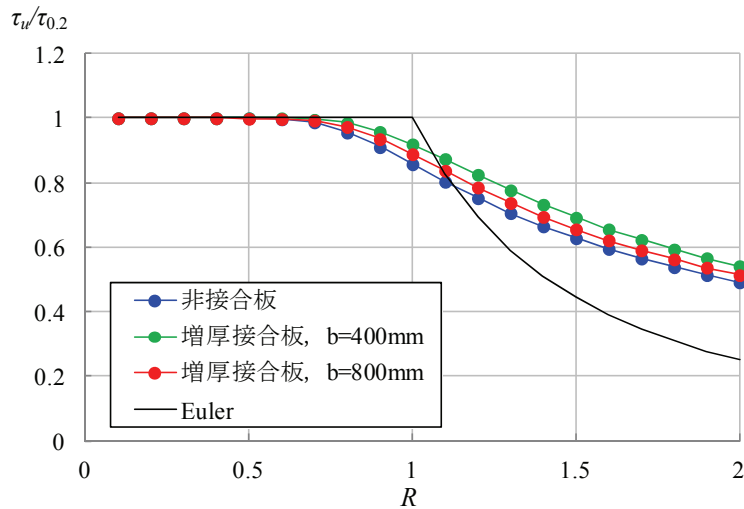


図-5.7 中央増厚接合板の $\tau_u/\tau_{0.2}-R$ 関係

中央増厚接合板の荷重と付加面外変位の関係を図-5.8に示す。長方形板の中心($a/2, b/2$)の付加面外変位 w を板幅 b で無次元化された値を横軸に採っている。図-5.8(a)に示すように、 $R=0.5$ の場合、非接合板と中央増厚接合板の付加面外変位は異なるが、両者とも長方形板の全領域が塑性化することによって終局状態を迎えるため、両者のせん断耐荷力は同じになる。一方、図-5.9(b)に示すように、 $R=1.6$ の場合、接合部が増厚されたことによる板曲げ剛性の増加によって、面外変位が抑制されることによって中央増厚接合板のせん断耐荷力は上昇する。

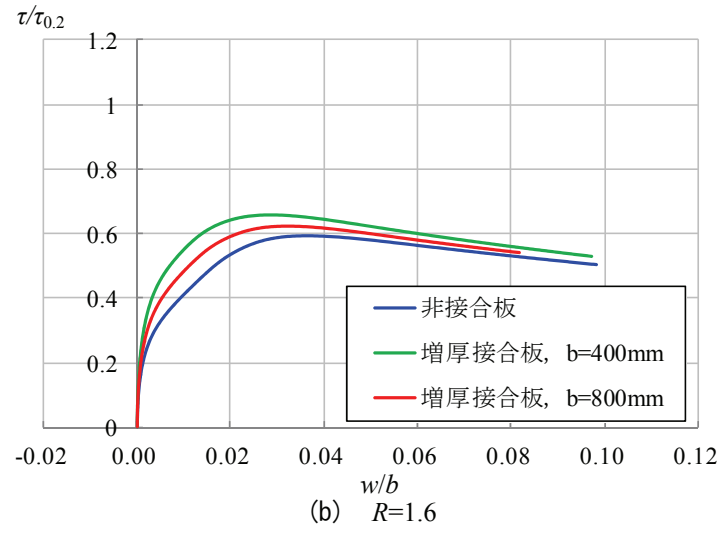
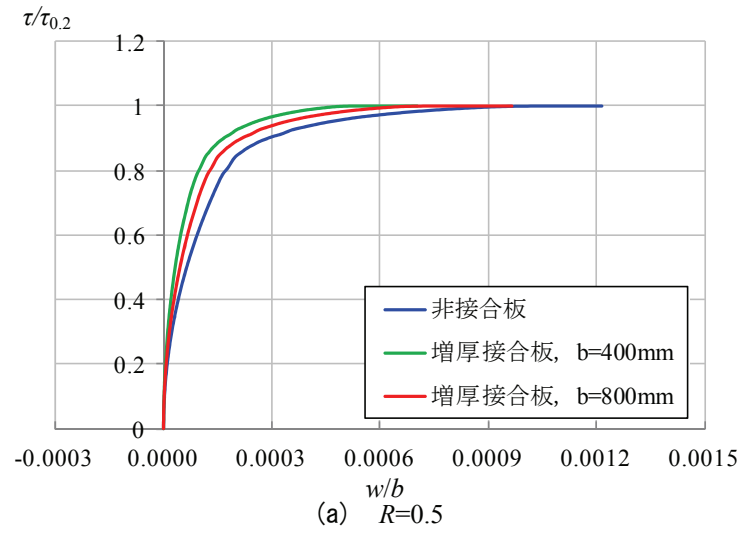


図-5.8 中央増厚接合板の荷重と付加面外変位の関係

非接合板と $b=400\text{mm}$ の中央増厚接合板の、最大荷重時の面外変形を表-5.4 に示す。長方形板の中心($a/2, b/2$)の付加面外変位も表に記している。各図から分かるように、非接合板と増厚接合板の面外変形形状は同様である。

表-5.4 最大荷重時の面外変形

	非接合板	中央増厚接合板
$R=0.5$	<p>$b=1/862$</p>	<p>$w/b=1/1426$</p>
$R=1.0$	<p>$v/b=1/53$</p>	<p>$w/b=1/80$</p>
$R=1.6$	<p>$v/b=1/27$</p>	<p>$w/b=1/35$</p>

残留応力が中央増厚接合板のせん断耐荷力に及ぼす影響を図-5.9に示す。板幅 $b=400\text{mm}$ の場合、残留応力によってせん断耐荷力が幾分低下する。これは、表-5.3に示すように、引張残留応力と自己平衡を取る圧縮残留応力が大きくなるためであると考えられる。非接合板の耐荷力が中央増厚接合板の下限値を与える。

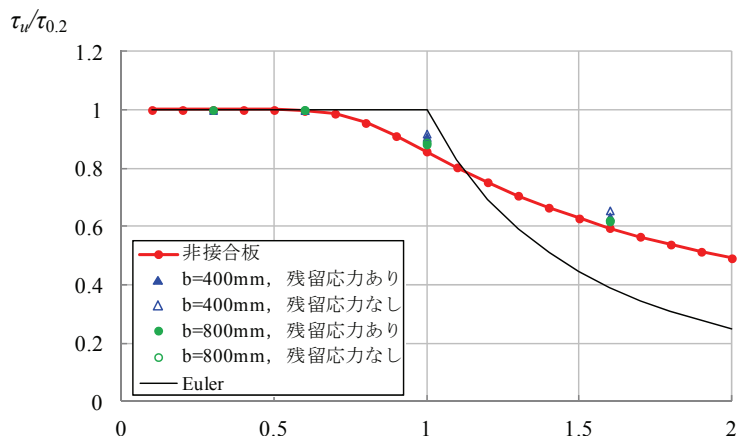


図-5.9 残留応力が中央増厚接合板のせん断耐荷力に及ぼす影響

5.5 A6061-T6 板と A6005C-T5 板の耐荷力の比較

非接合板および強度低下評価モデル M と F の板に対して、A6061-T6 と A6005C-T5 の耐荷力の比較を図-5.10に示す(A6005C-T5 の非接合板および強度低下評価モデル M と F に対する FEM 解析値は付録 B-2 参照)。図-5.10(a)の非接合板に対して、縦軸と横軸にそれぞれ $\tau_u/\tau_{0.2}$ と R が採られ、図-5.10(b)の強度低下評価モデル M および図-5.10(c)の強度低下評価モデル F に対して、縦軸と横軸にそれぞれ $\tau_u/\tau_{0.2}$ と R_j が採られている。長方形板の縦横比は $\alpha=6.5$ である。式(3.4)の初期たわみを考慮し、最大初期たわみは $w_{0\max}=b/250$ である。 $\alpha=6.5$ に対する座屈モード数 5 (図-2.2 参照)を式(3.4)の m に用いている。各図からわかるように、A6061-T6 板と A6005C-T5 板の耐荷力はほぼ一致する。

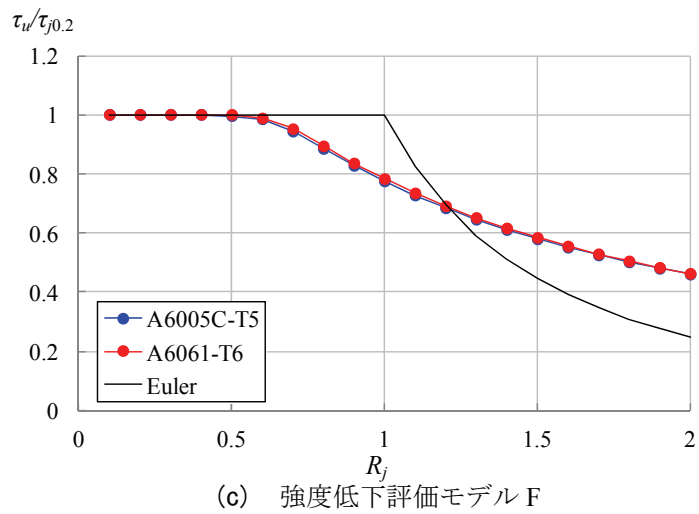
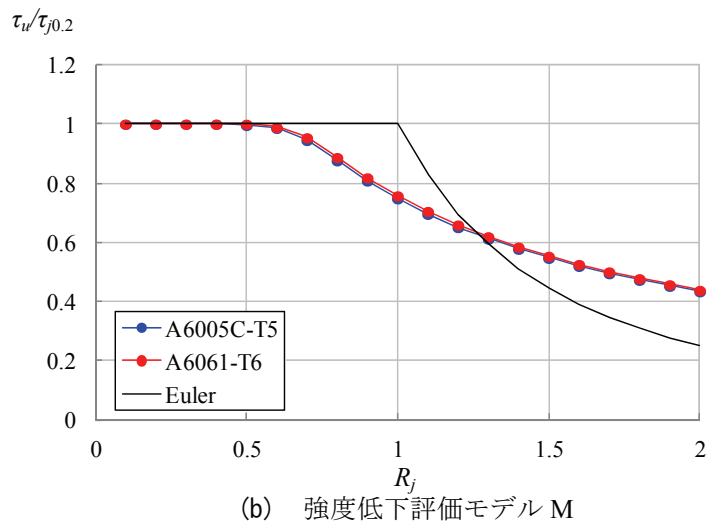
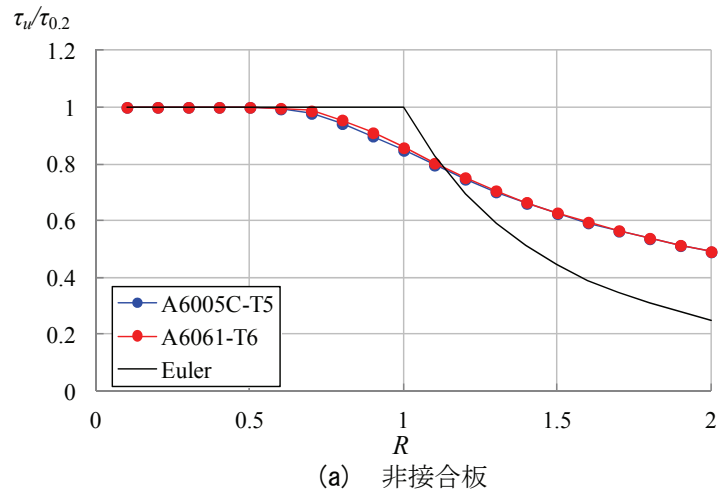
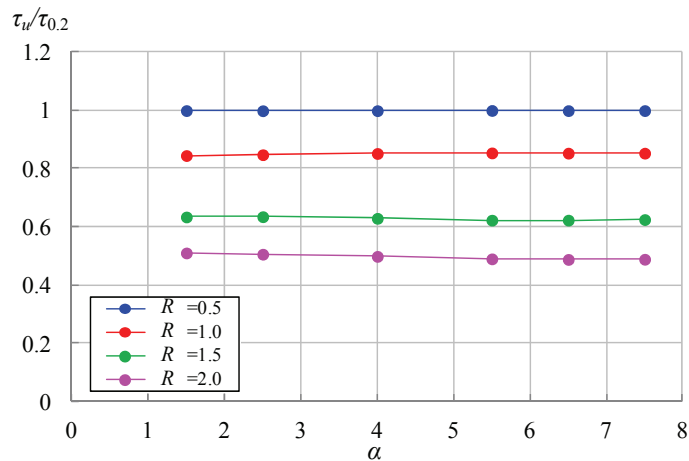


図-5.10 A6061-T6 板と A6005C-T5 板のせん断耐荷力の比較

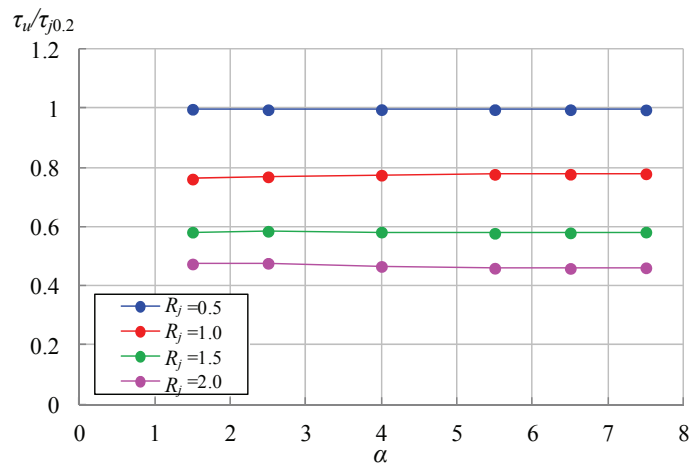
5.6 せん断耐力と縦横比の関係

せん断耐力と縦横比の関係を図-5.11 に示す。これは、A6061-T6 の非接合板および同合金に対する強度低下評価モデル M と F の結果である。式(3.4)の初期たわみを考慮し、最大初期たわみは $w_{0\max}=b/250$ である。長方形板の各縦横比に対する座屈モード数を式(3.4)の m (図-2.2 参照) に使用する。図-5.11 (a) の非接合板に対して、縦軸に $\tau_u/\tau_{0.2}$ が採られ、幅厚比パラメータに R が用いられている。図-5.11 (b) の強度低下評価モデル M および図-5.11 (c) の強度低下評価モデル F に対して、縦軸に $\tau_u/\tau_{j0.2}$ が採られ、幅厚比パラメータに R_j が用いられている。 R と R_j の中のせん断座屈係数 k に対して式(2.3)が用いられている。

図-5.11 の各図から分かるように、 R または R_j の各値に対して、せん断耐力 $\tau_u/\tau_{0.2}$ または $\tau_u/\tau_{j0.2}$ の値はほぼ一定である。したがって、式(3.7)で定義される幅厚比パラメータ R および式(3.9)で定義される幅厚比パラメータ R_j を用いることにより、これまで述べてきた $\alpha=6.5$ の長方形板に対するせん断耐力は、 α が 1 以上の長方形板に適用できる。



(a) 非接合板



(b) 強度低下評価モデル M

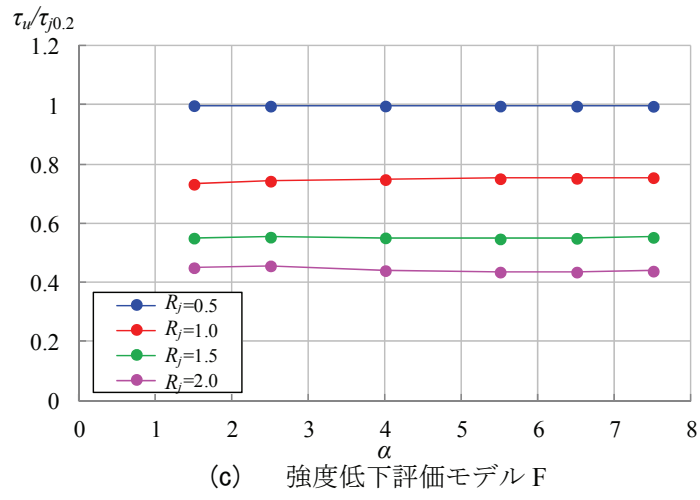
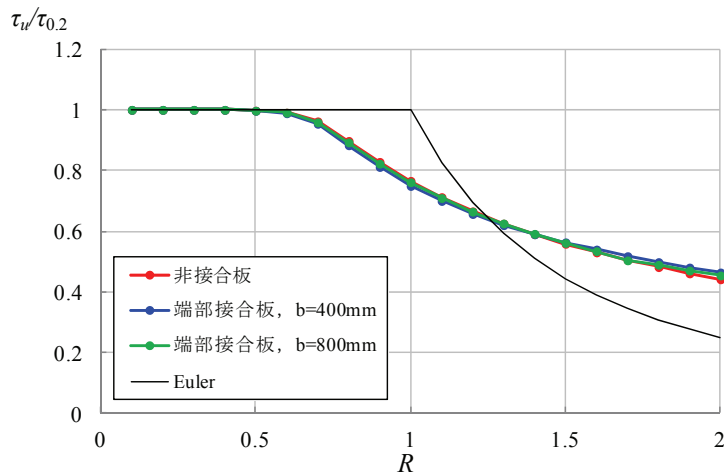


図-5.11 せん断耐荷力と縦横比の関係

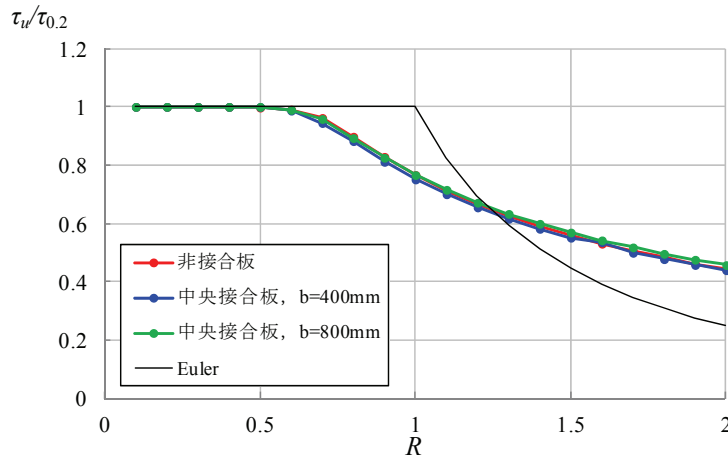
第 6 章 A5083-O 板のせん断耐荷力

6.1 残留応力がせん断耐荷力に与える影響

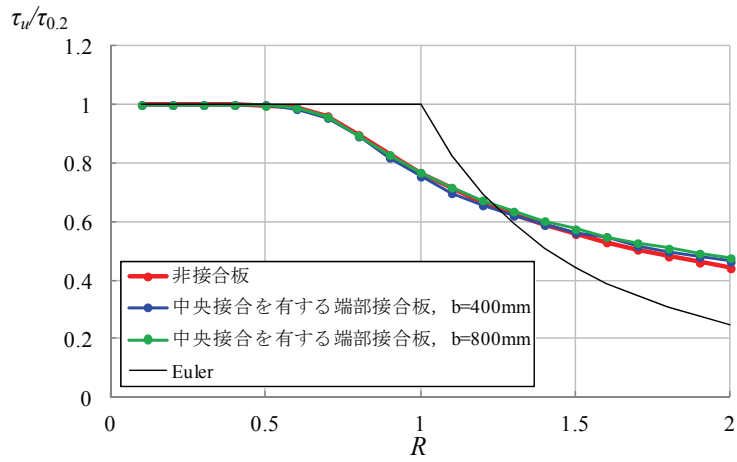
A5083-O の非接合板, 端部接合板, 中央接合板および中央接合を有する端部接合板の $\tau_u/\tau_{0.2}-R$ 関係を図-6.1 に示す(A5083-O の非接合板に対する FEM 解析値は付録 B-3 参照). 解析対象は, 縦横比が $\alpha=6.5$ の長方形板で, 式(3.4)の初期たわみを考慮し, 最大初期たわみは $w_{0max}=b/250$ である. 縦横比 $\alpha=6.5$ に対する座屈モード数 5 (図-2.2 参照) を式(3.4)の m に使用する. 各接合板の板幅に対して, $b=400\text{mm}$ および $b=800\text{mm}$ を考慮する. 3.4 節の残留応力を考慮する. 各図から分かるように, 残留応力を考慮した接合板の耐荷力は非接合板のそれにほぼ一致するので, 残留応力が耐荷力に与える影響は小さい. 引張残留応力と自己平衡を取る圧縮残留応力を表-6.1 に示す. A5083-O の接合板の $\sigma_r/\sigma_{0.2}$ は, 表-5.3 に示す A6061-T6 のそれよりも大きい. しかし, A5083-O 板の場合, 図-3.1(c) に示すように, 応力-ひずみ関係が 0.2%耐力に近づくに従って大きく曲がり, 接線係数が低下することによる影響が, 残留応力による影響より大きいために, 残留応力が A5083-O 板の耐荷力にあまり影響しないと推察される.



(a) 端部接合板



(b) 中央接合板



(c) 中央接合を有する端部接合板

図-6.1 $\tau_u/\tau_{0.2}-R$ 関係

表-6.1 A5083-O の接合板の圧縮残留応力の値

	板幅 b (mm)	$\sigma_{rc}/\sigma_{0.2}$
端部接合板	400	0.143
	800	0.067
中央接合板	400	0.143
	800	0.067
中央接合を有する端部接合板	400	0.333
	800	0.143

6.2 せん断耐力と縦横比の関係

せん断耐力と縦横比の関係を図-6.2 に示す。これは、A5083-O の非接合板に対する結果である。式(3.4)の初期たわみを考慮し、最大初期たわみは $w_{0\max}=b/250$ である。長方形板の各縦横比に対する座屈モード数を式(3.4)の m に使用する (図-2.2 参照)。図から分かるように、幅厚比パラメータの各値に対して、せん断耐力 $\tau_u/\tau_{0.2}$ の値はほぼ一定である。したがって、式(3.7)で定義される幅厚比パラメータを用いることにより、前述の $\alpha=6.5$ の長方形板に対するせん断耐力は、 α が 1 以上の長方形板に適用できる。

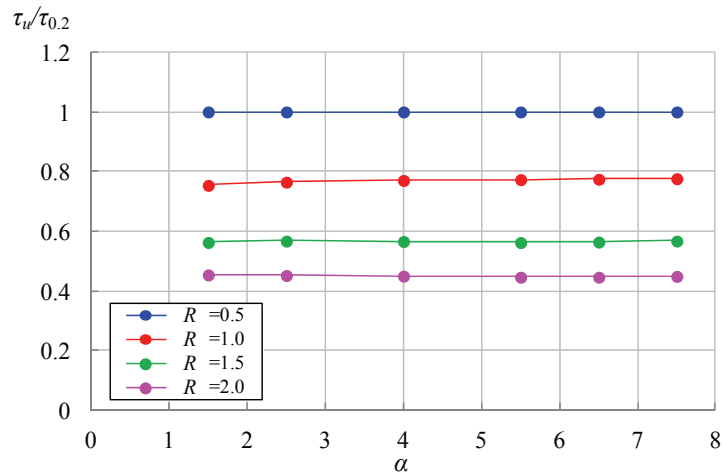


図-6.2 せん断耐力と縦横比の関係

第7章 耐荷力曲線

7.1 耐荷力曲線の定式化

A6061-T6, A6005C-T5, A5083-O の $\tau_u/\tau_{0.2}-R$ 関係 (または $\tau_u/\tau_{j0.2}-R_j$ 関係) は, $0.8 < \tau_u/\tau_{0.2} < 1.0$ (または $0.8 < \tau_u/\tau_{j0.2} < 1.0$) で上向きの曲線, $0.8 > \tau_u/\tau_{0.2}$ (または $0.8 > \tau_u/\tau_{j0.2}$) で下向きの曲線になる. これを考慮して, 面内せん断を受けるアルミニウム長方形板の耐荷力曲線として, 次式を採用する.

$$\frac{\tau_u}{\tau_{p0.2}} = \begin{cases} 1 & (R_p \leq R_{cr}) \\ \frac{Q_1}{R_p} - \frac{Q_2}{R_p^2} & (R_{cr} < R_p < R_{0.8}) \\ Q_3 \left(\frac{R_{0.8}}{R_p} \right)^{Q_4} & (R_{0.8} \leq R_p) \end{cases} \quad (7.1)$$

$$R_p = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\tau_{p0.2}}{E}} \beta \quad (7.2)$$

ここに,

- $\tau_{p0.2}$: $\tau_{0.2}$ または $\tau_{j0.2}$
- R_p : $\tau_{p0.2}$ を用いた幅厚比パラメータ
- R_{cr} : 耐荷力曲線が $\tau_u/\tau_{p0.2}=1.0$ に交差する幅厚比パラメータ R_p の値
- $R_{0.8}$: $\tau_u/\tau_{p0.2}=0.8$ に対する幅厚比パラメータ R_p の値
- Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 : 定数

耐荷力曲線の区分と R_{cr} , $R_{0.8}$, Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 の値を表-7.1 に示す. 同表には, アルミニウム合金と接合板の組合せに対して, $\tau_{p0.2}$ に使用する $\tau_{0.2}$ と $\tau_{j0.2}$ の区別も示してある. Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 の値は, FEM 解析値に式(7.1)の曲線を仮定し, 最小自乗法を適用することにより得られる値である. 耐荷力曲線の比較を図-7.1 に示す. 次に, 耐荷力曲線の区分の仕方について述べる.

A6061-T6 の非接合板の耐荷力曲線には, 図-5.1 の $m=5$ に対する非接合板の FEM 解析値を適用する. A6061-T6 の端部接合板と中央接合を有する端部接合板に対して, 図-5.5(a) と (c) の強度低下評価モデル M の FEM 解析値を適用する. A6061-T6 の中央接合板に対して, 図-5.5(b) の強度低下評価モデル F の FEM 解析値を適用する. 図-5.9 に示すように, A6061-T6 の中央増厚接合板の耐荷力は非接合板の耐荷力を下回ることがないので, 中央増厚接合板の耐荷力に対して非接合板の耐荷力を適用する. 5.5 節で述べたように, A6061-T6 板と A6005C-T5 板の耐荷力はほぼ一致するので, 両者の耐荷力区分は同じにする.

図-6.1 に示すように, A5083-O のせん断耐荷力に接合位置と接合方法の影響はないので, A5083-O のせん断耐荷力に対して, 非接合板の FEM 解析値を適用する. 他方, 図-7.2 に示すように, $\tau_u/\tau_{p0.2}$ と R_p で表された A5083-O の非接合板の耐荷力は, A6061-T6 の強度低下評価モデル M の耐荷力と一致する. これは, 表-3.1 に示すように, 両者のひずみ硬化パラメータの値は同

じであり、両者の0.2%耐力もお互いに近い値であるからである。したがって、A5083-Oの非接合板の耐力曲線は、A6061-T6の端部接合板および中央接合を有する端部接合板の耐力区分と同じにする。

表-7.1 耐力曲線の区分と R_{cr} , $R_{0.8}$, Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 の値

アルミニウム合金	非接合板 中央増厚接合板*	端部接合板 中央接合を有する端部接合板	中央接合板
A6061-T6 A6005C-T5	JA ($\tau_{0.2}$)	JB ($\tau_{j0.2}$)	JC ($\tau_{j0.2}$)
A5083-O	JB ($\tau_{0.2}$)		

* : 中央増厚接合板は A5083-O に適用されない。

記号	R_{cr}	$R_{0.8}$	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
JA	0.63	1.09	1.23	0.38	0.80	0.81
JB	0.53	0.92	1.02	0.26	0.80	0.76
JC	0.53	0.96	1.06	0.28	0.80	0.73

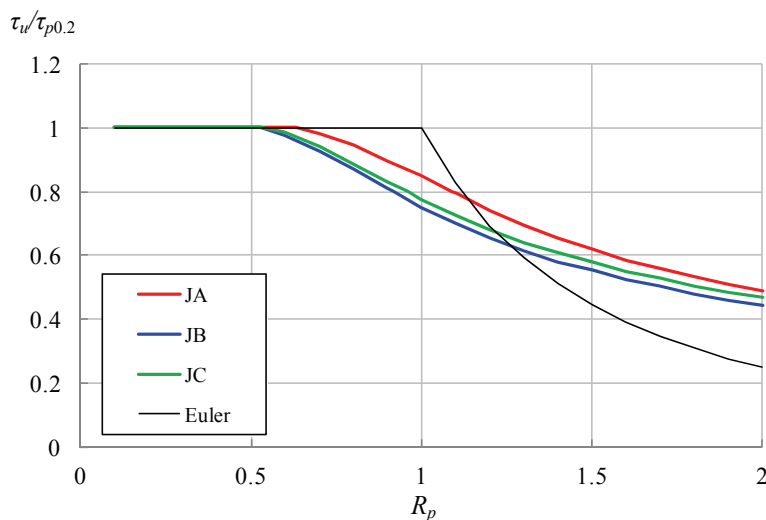


図-7.1 耐力曲線の比較

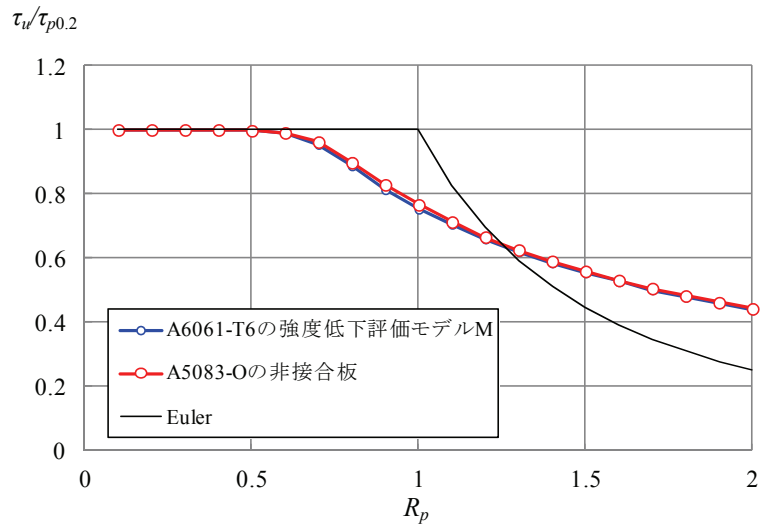


図-7.2 A6061-T6 の強度低下評価モデル M の耐荷力と A5083-O の非接合板のそれとの比較

式(7.1)が与える耐力力曲線と FEM 解析値との比較を図-7.3 に示す。式(7.1)の耐力力曲線の上に FEM 解析値が乗っている。

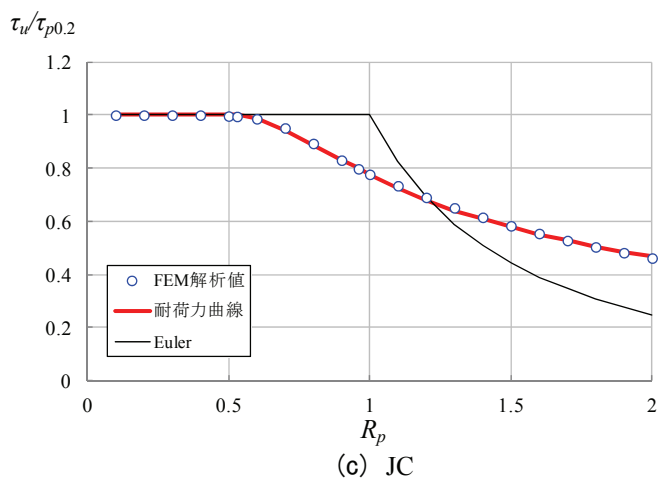
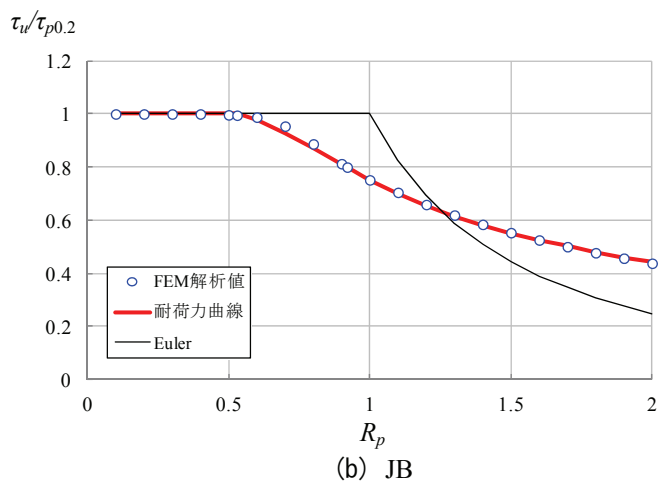
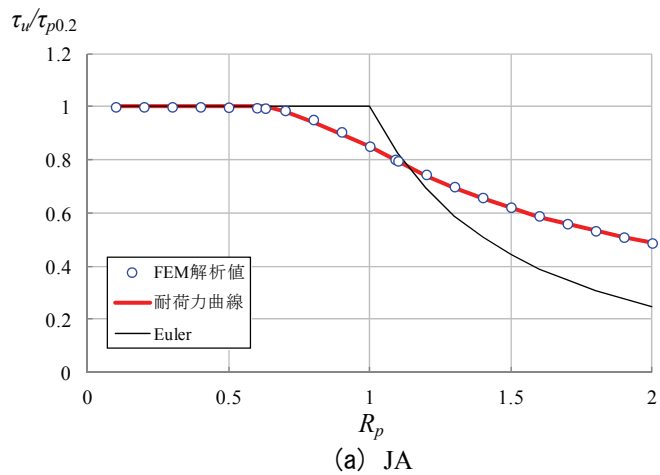


図-7.3 耐力力曲線と FEM 解析値との比較

7.2 Eurocode 9 の耐荷力曲線との比較

図-7.4 を参照して、Eurocode 9¹⁹⁾においては、次の耐荷力曲線が規定されている。

(a) 剛端支持 (ES1) に対して、

$$\frac{\tau_u}{\tau_{0.2}} = \begin{cases} \eta & (R \leq 0.83/\eta) \\ \frac{0.83}{R} & (0.83/\eta < R < 0.937) \\ \frac{2.3}{1.66 + R} & (0.937 \leq R) \end{cases} \quad (7.3)$$

(b) 非剛端支持 (ES2) に対して、

$$\frac{\tau_u}{\tau_{0.2}} = \begin{cases} \eta & (R \leq 0.83/\eta) \\ \frac{0.83}{R} & (0.83/\eta < R) \end{cases} \quad (7.4)$$

ここに、
$$\eta = 0.7 + 0.35 \frac{\sigma_u}{\sigma_{0.2}} \quad (\eta \leq 1.2) \quad (7.5)$$

σ_u : 引張強さ

式(7.3)と(7.4)は、MIG 溶接による端部接合板の耐荷力曲線に対応する。本研究の耐荷力曲線 JB と Eurocode 9 の耐荷力曲線 ES1[式(7.3)]および ES2[式(7.4)]の比較を図-7.5 に示す。Eurocode 9 では、0.2%耐力以上のひずみ硬化を耐荷力に考慮しているため、 $\tau_u/\tau_{p0.2}$ が 1 を超える。本研究で採用した長方形板の両端の面内方向の境界条件は、図-7.5(b)の非剛端支持に対応する。したがって、幅厚比パラメータが大きくなるに従って、耐荷力曲線 JB と耐荷力曲線 ES2 はお互いに漸近する。

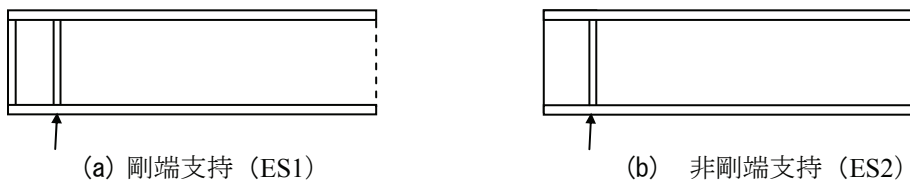


図-7.4 桁端支持条件

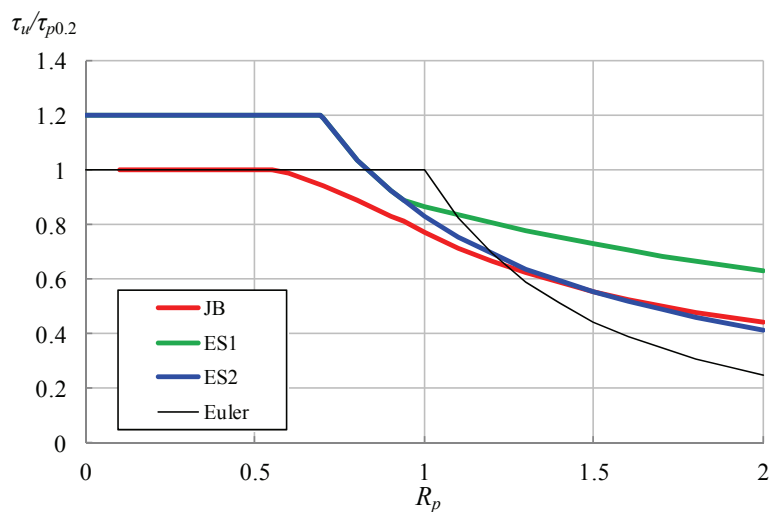


図-7.5 Eurocode 9 の耐荷力曲線との比較

米国アルミニウム協会が定めた AA 基準²⁰⁾においては，座屈強度が基準強度に採用されているため，本研究の耐荷力曲線との比較対象にならない。

第 8 章 結論

本研究では、面内せん断を受ける長方形板の耐荷力を有限要素法による弾塑性有限変位解析によって明らかにした。考慮したアルミニウム合金は、熱処理アルミニウム合金 A6061-T6, A6005C-T5, 非熱処理アルミニウム合金 A5083-O である。主な結論は次の通りである。

- (1) 面内せん断を受ける長方形板の座屈モード数を明らかにした (図-2.2 参照)。
- (2) 面内せん断を受ける長方形板の座屈強度および座屈時のせん断変形角 [式(2.2)参照] の値は、表-2.1 に示す、面内方向にせん断変形を起こさせる境界条件の種類に依らず一定になる。さらに、面内せん断を受ける長方形板の耐荷力および最大荷重時のせん断変形角の値も、表-2.1 に示す、面内方向にせん断変形を起こさせる境界条件の種類に依らず一定になる。
- (3) 座屈モード数に等しい波数を長方形板の長さ方向に有する初期たわみは、長方形板の長さ方向に 1 波の初期たわみより、幅厚比パラメータ R [式(3.7)参照] が 0.7 から 1.1 の範囲で、耐荷力を幾分低下させる。長方形板の板幅方向の初期たわみ波形に対して、耐荷力は変化しない。
- (4) 長方形板の長さ方向に 1 波の初期たわみに対して、最大初期たわみの大きさが変化しても耐荷力は変わらないが、座屈モード数に等しい波数を有する初期たわみに対して、 R が 0.6 から 1.1 の範囲で、最大初期たわみが大きくなると、耐荷力がわずかに低下する。
- (5) A6061-T6 の接合板では、残留応力によって耐荷力が幾分低下する可能性があるが、端部接合板、中央接合板、中央接合を有する端部接合板に対して強度低下評価モデル M または F (5.3 節参照) の耐荷力が下限値を与える。中央増厚接合板に対して非接合板の耐荷力が下限値を与える。
- (6) A6061-T6 板と A6005C-T5 板の耐荷力はほぼ一致する。
- (7) A5083-O 板においては、接合位置、接合方法、残留応力の影響はほとんどない。
- (8) 本研究の成果に基づいて、次の耐荷力曲線を与えた。

$$\frac{\tau_u}{\tau_{p0.2}} = \begin{cases} 1 & (R_p \leq R_{cr}) \\ \frac{Q_1}{R_p} - \frac{Q_2}{R_p^2} & (R_{cr} < R_p < R_{0.8}) \\ Q_3 \left(\frac{R_{0.8}}{R_p} \right)^{Q_4} & (R_{0.8} \leq R_p) \end{cases}$$

$$R_p = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{\tau_{p0.2}}{E}} \beta$$

$$k = 5.34 + \frac{4}{\alpha^2} \quad (\alpha \geq 1)$$

ここに、
 $\tau_{p0.2}$: $\tau_{0.2}$ または $\tau_{j0.2}$
 R_p : $\tau_{p0.2}$ を用いた幅厚比パラメータ
 R_{cr} : 耐力曲線が $\tau_u/\tau_{p0.2}=1.0$ に交差する幅厚比パラメータ R_p の値
 $R_{0.8}$: $\tau_u/\tau_{p0.2}=0.8$ に対する幅厚比パラメータ R_p の値
 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 : 定数

耐力曲線の区分と、 $R_{cr}, R_{0.8}, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ の各値を次表に示す。

アルミニウム合金	非接合板 中央増厚接合板*	端部接合板 中央接合を有する端部接合板	中央接合板
A6061-T6 A6005C-T5	JA ($\tau_{0.2}$)	JB ($\tau_{j0.2}$)	JC ($\tau_{j0.2}$)
A5083-O	JB ($\tau_{0.2}$)		

* : 中央増厚接合板は A5083-O に適用されない。

記号	R_{cr}	$R_{0.8}$	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
JA	0.63	1.09	1.23	0.38	0.80	0.81
JB	0.53	0.92	1.02	0.26	0.80	0.76
JC	0.53	0.96	1.06	0.28	0.80	0.73

参考文献

- 1) 鋼構造委員会：21世紀の建設材料 アルミニウム合金の可能性，土木学会，平成22年度全国大会研究討論会，研-06資料，2010.
- 2) アルミニウム橋研究会：蒲原ケミカル橋，<http://alst.jp/str/bridge/kanbara.htm>
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，2002.
- 4) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，1979.
- 5) 日本アルミニウム協会(旧軽金属協会)：アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案（第1次改訂試案），1998.
- 6) 大倉一郎，萩澤亘保，花崎昌幸：アルミニウム構造学入門，東洋書店，2006.
- 7) 大倉一郎，北村幸嗣，赤碓圭輔，卯瀧高久，ビッグ・ラズロ・ゲルゲリ，三河克己：新しいアルミニウム合金製補剛桁の提案，構造工学論文集，Vol.51A，pp.203-210，2005.
- 8) 萩澤亘保，大倉一郎：アルミニウム合金 A6005C-T5 の母材と摩擦攪拌接合部の疲労強度に応力比が与える影響，土木学会論文集 A，Vol.65，No.1，pp.117-122，2009.
- 9) 大倉一郎，小笠原康二：接合位置を考慮したアルミニウム合金板の圧縮耐荷力，構造工学論文集，Vol.56A，pp.111-121，2010.
- 10) 小笠原康二，大倉一郎：接合位置を考慮したアルミニウム合金板の曲げ耐荷力，ALST 研究レポート，No.15，2010.
- 11) 大倉一郎，小笠原康二：アルミニウム合金製自由突出板の圧縮耐荷力，ALST 研究レポート，No.12，2009.
- 12) 奈良敬，出口恭司，福本昉士：純せん断応力を受ける鋼板の極限強度特性に関する研究，土木学会論文集，No.392/I-9，pp.265-271，1988.
- 13) S. Kuranishi, M. Nakazawa and T. Iwakuma: A new formula to predict the ultimate shear strength of a plate girder, Japan Society of Civil Engineers, Structural Eng./ Earthquake Eng., Vol.6, No.2, pp.239s-250s, 1989.
- 14) 葛西昭，渡辺智彦，宇佐美勉，Chusilp, Praween：せん断を受ける無補剛箱形断面部材の強度と変形能，土木学会論文集，No.703/I-59，pp.129-140，2002.
- 15) 小川靖之，藤井堅，中村秀治：垂直補剛材を考慮したプレートガーダーの終局強度相関曲線の提案，土木学会論文集 A，Vol.63，No.2，pp.356-373，2007.
- 16) 日本マーク：MARC，K6，2005.
- 17) Timoshenko, S.P. and Gere, J.M.: Theory of Elastic Stability, McGRAW-HILL Book Company, pp.382-383, 1963.
- 18) 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.
- 19) Eurocode 9: Design of Aluminum Structures – Part 1-1: General structural rules, EN1999-1-1, 2007.

- 20) The Aluminum Association: Specifications for Aluminum Structures, 2000.
- 21) 大倉一郎, 佐藤純: 摩擦攪拌接合を考慮した突起付きアルミニウム合金板の提案, ALST 研究レポート, No.11, 2009.

付録 A

押出型材を摩擦攪拌接合によって突合せ接合することによって製作された突起付きアルミニウム合金パネル²¹⁾を図-A1に示す. この突起付きアルミニウム合金パネルの初期たわみの測定結果を図-A2に示す²¹⁾.

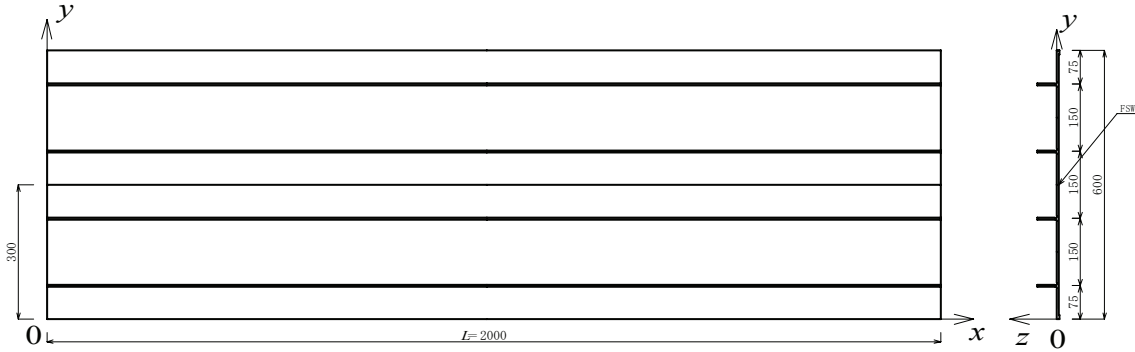


図-A1 突起付きアルミニウム合金パネル

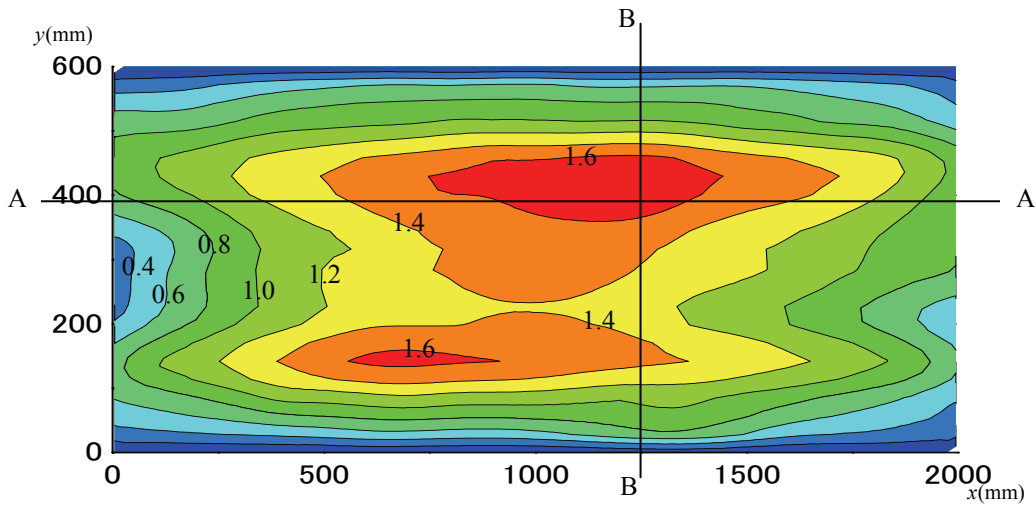


図-A2 突起付きアルミニウム合金パネルの初期たわみ形状

図-A2に示す, 最大の初期面外たわみが発生した位置を通過する断面 A-A ($y=396\text{mm}$) のたわみ形状を図-A3に示す. 同図には, このたわみ形状に最小自乗法を適用することによって得られる次式が与える曲線も描いてある.

$$\begin{aligned}
 w = & 0.729 + 0.958 \left[\sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) - 0.0488 \sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right) + 0.171 \sin\left(\frac{3\pi x}{a}\right) - 0.0102 \sin\left(\frac{4\pi x}{a}\right) + 0.0897 \sin\left(\frac{5\pi x}{a}\right) \right. \\
 & \left. - 0.0191 \sin\left(\frac{6\pi x}{a}\right) + 0.0455 \sin\left(\frac{7\pi x}{a}\right) + 0.00326 \sin\left(\frac{8\pi x}{a}\right) + 0.00878 \sin\left(\frac{9\pi x}{a}\right) - 4.63 \times 10^{-17} \sin\left(\frac{10\pi x}{a}\right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{A.1}$$

この式から分かるように、 x 軸方向、すなわちパネルの長さ方向にはサインの 1 波形が卓越している。

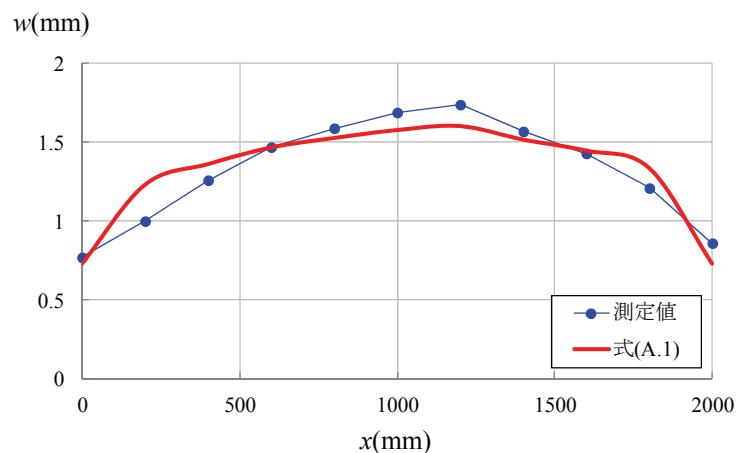


図-A3 断面 A-A のたわみ

図-A2 に示す、最大の初期面外たわみが発生した位置を通過する断面 B-B ($x=1200\text{mm}$) のたわみを図-A4 に示す。同図には、このたわみ形状に最小自乗法を適用することによって得られる次式が与える曲線も描いてある。

$$w = 0.576 + 0.820 \left[\sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) - 0.0608 \sin\left(\frac{2\pi y}{b}\right) + 0.232 \sin\left(\frac{3\pi y}{b}\right) - 0.0408 \sin\left(\frac{4\pi y}{b}\right) + 0.0134 \sin\left(\frac{5\pi y}{b}\right) \right. \\ \left. + 0.0105 \sin\left(\frac{6\pi y}{b}\right) - 0.00815 \sin\left(\frac{7\pi y}{b}\right) - 0.0217 \sin\left(\frac{8\pi y}{b}\right) - 2.60 \times 10^{-17} \sin\left(\frac{9\pi y}{b}\right) + 0.0217 \sin\left(\frac{10\pi y}{b}\right) \right] \quad (\text{A.2})$$

この式から分かるように、 y 軸方向、すなわちパネルの幅方向にはサインの 1 波形と 3 波形が卓越している。

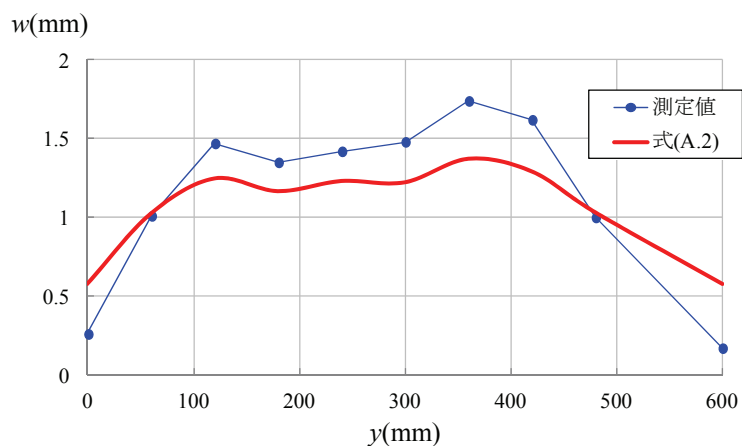


図-A4 断面 B-B のたわみ

付録 B

B.1 A6061-T6 の FEM 解析値

(a) 非接合板

R	$\tau_u/\tau_{0.2}$
0.1	1.00
0.2	1.00
0.3	1.00
0.4	1.00
0.5	1.00
0.6	1.00
0.7	0.99
0.8	0.95
0.9	0.91
1.0	0.85
1.1	0.80
1.2	0.75
1.3	0.70
1.4	0.66
1.5	0.62
1.6	0.59
1.7	0.56
1.8	0.53
1.9	0.51
2.0	0.49

(b) 強度低下評価モデル M

R_j	$\tau_u/\tau_{j0.2}$
0.1	1.00
0.2	1.00
0.3	1.00
0.4	1.00
0.5	1.00
0.6	0.99
0.7	0.95
0.8	0.89
0.9	0.81
1.0	0.75
1.1	0.71
1.2	0.66
1.3	0.62
1.4	0.58
1.5	0.55
1.6	0.53
1.7	0.50
1.8	0.48
1.9	0.46
2.0	0.44

(c) 強度低下評価モデル F

R_j	$\tau_u/\tau_{j0.2}$
0.1	1.00
0.2	1.00
0.3	1.00
0.4	1.00
0.5	1.00
0.6	0.99
0.7	0.95
0.8	0.89
0.9	0.83
1.0	0.78
1.1	0.73
1.2	0.69
1.3	0.65
1.4	0.62
1.5	0.58
1.6	0.55
1.7	0.53
1.8	0.50
1.9	0.48
2.0	0.46

B.2 A6005C-T5 の FEM 解析値

(a) 非接合板

R	$\tau_u/\tau_{0.2}$
0.1	1.00
0.2	1.00
0.3	1.00
0.4	1.00
0.5	1.00
0.6	0.99
0.7	0.98
0.8	0.94
0.9	0.90
1.0	0.85
1.1	0.80
1.2	0.75
1.3	0.70
1.4	0.66
1.5	0.63
1.6	0.59
1.7	0.56
1.8	0.54
1.9	0.51
2.0	0.49

(b) 強度低下評価モデル M

R_j	$\tau_u/\tau_{j0.2}$
0.1	1.00
0.2	1.00
0.3	1.00
0.4	1.00
0.5	1.00
0.6	0.99
0.7	0.95
0.8	0.88
0.9	0.81
1.0	0.75
1.1	0.70
1.2	0.65
1.3	0.61
1.4	0.58
1.5	0.55
1.6	0.52
1.7	0.50
1.8	0.47
1.9	0.45
2.0	0.43

(c) 強度低下評価モデル F

R_j	$\tau_u/\tau_{j0.2}$
0.1	1.00
0.2	1.00
0.3	1.00
0.4	1.00
0.5	1.00
0.6	0.98
0.7	0.94
0.8	0.88
0.9	0.83
1.0	0.78
1.1	0.73
1.2	0.68
1.3	0.65
1.4	0.61
1.5	0.58
1.6	0.55
1.7	0.52
1.8	0.50
1.9	0.48
2.0	0.46

B.3 A5083-0 の非接合板の FEM 解析値

R	$\tau_u/\tau_{0.2}$
0.1	1.00
0.2	1.00
0.3	1.00
0.4	1.00
0.5	1.00
0.6	0.99
0.7	0.96
0.8	0.90
0.9	0.83
1.0	0.77
1.1	0.71
1.2	0.67
1.3	0.63
1.4	0.59
1.5	0.56
1.6	0.53
1.7	0.51
1.8	0.48
1.9	0.46
2.0	0.44