

アルミニウム合金の応力－ひずみ関係 および接合による残留応力

大倉 一郎¹ 長尾 隆史² 石川 敏之³ 萩澤 亘保² 大隅 心平⁴

- ¹正会員 大阪大学准教授 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)
²正会員 日本軽金属株式会社 グループ技術センター (〒421-3203 静岡県静岡市清水区蒲原 1-34-1)
³正会員 京都大学助教 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)
⁴非会員 (株)住軽日軽エンジニアリング 技術部 (〒136-0071 東京都江東区亀戸 2-35-13 新永ビル)

要旨

土木構造物には A6061-T6, A6N01-T5 および A5083-O などのアルミニウム合金材が使用される。本研究では上記 3 種のアルミニウム合金の引張試験結果を統計解析し、ヤング係数およびひずみ硬化に関するパラメータの特性を調査した。そして、非超過確率 5% に対応するひずみ硬化に関するパラメータを用いてアルミニウム合金の応力－ひずみ関係を定式化した。さらに、MIG 溶接および摩擦攪拌接合によって製作された突合せ継手に対して引張試験および残留応力の測定を実施し、接合部の応力－ひずみ関係および残留応力分布の定式化を試みた。

キーワード：アルミニウム合金，応力－ひずみ関係，溶接，摩擦攪拌接合，残留応力

1. はじめに

アルミニウム合金はこれまで防護柵など付属品的な用途以外に社会基盤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。しかし初期コストだけでなく、耐用年数を考慮に入れたライフサイクルコストを重視する近年の傾向から、維持管理コストが少なくすむアルミニウム合金製の歩道橋¹⁾²⁾や歩道用アルミニウム床版³⁾⁴⁾が建設されるようになってきた。

これらのアルミニウム合金製構造物の設計は、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案⁵⁾に従ってなされる。この指針案の板要素に対する幅厚比の規定および桁構造に関する諸規定は、道路橋示方書⁶⁾の規定を、鋼のヤング率 200GPa をアルミニウム合金のヤング率 70GPa に置き換え、鋼の降伏応力をアルミニウム合金の 0.2% 耐力に置き換えることによって与えられたものである。鋼の応力－ひずみ関係は降伏応力まで直線で、降伏応力に達すると水平線とみなされるが、アルミニウム合金の応力－ひずみ関係は、0.2% 耐力の近くで非線形になる。さらに、A5083-O などの 5000 系アルミニウム合金(非熱処理合金)と A6061-T6 や A6N01-T5 などの 6000 系アルミニウム合金(熱処理合金)の応力－ひずみ関係の曲がり方の程度は両者で大きく異なる。したがって、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案の前述した諸規定は、アルミニウム合金製の板要素および桁構造の実際の挙動を正しく反映したものとはなっていないと考えられる。

アルミニウム構造物の製作には MIG 溶接や摩擦攪拌接合が使用される。MIG 溶接や摩擦攪拌接合によって製作されたアルミニウム部材には残留応力が生じるため、部材の耐荷力は低下する。さらに熱処理アルミニウム合金である 6000 系は、MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部が軟化するため、これらの応力－ひずみ関係は母材のそれと異なる。

アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案の板要素に対する幅厚比の規定および桁構造に関する諸規定を今後検証するためには、アルミニウム合金の応力-ひずみ関係およびMIG溶接部と摩擦攪拌接合部の応力-ひずみ関係が定式化され、さらにMIG溶接および摩擦攪拌接合によって発生する残留応力が明らかにされなければならない。

本研究では土木構造物に用いられるA6061-T6, A6N01-T5およびA5083-Oのアルミニウム合金の引張試験結果を統計解析し、アルミニウム合金の応力-ひずみ関係を定式化すること、ならびにMIG溶接および摩擦攪拌接合によって製作された突合せ継手に対して引張試験および残留応力の測定を実施し、接合部の応力-ひずみ関係および残留応力分布の定式化することを研究目的とする。

2. アルミニウム合金の応力-ひずみ関係

(1) Ramberg-Osgood 式

アルミニウム構造物の構造解析または耐荷力研究に用いられる応力-ひずみ関係式として、一般に次のRamberg-Osgood 式が用いられる⁷⁾。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (1)$$

ここに、 ε, σ : それぞれひずみと応力

E : ヤング係数

$\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力

n : 定数

式(1)の右辺第1項が弾性ひずみを表し、右辺第2項が塑性ひずみを表す。 E は応力-ひずみ関係の原点における接線の傾きであり、70GPaが用いられることが多い。

n は非弾性領域のひずみ硬化を特徴付けるパラメータであり、本研究ではひずみ硬化パラメータと呼ぶ。ひずみ硬化パラメータ n に対してMazzolaniは、熱処理アルミニウム合金で20~40より大きく、非熱処理アルミニウム合金で10~20より小さいことを示している⁸⁾。

(2) ヤング係数Eとひずみ硬化パラメータnの調査

ヤング係数とひずみ硬化パラメータを決定するために、A6061-T6, A6N01-T5 および A5083-O に対してそれぞれ6ロット、2ロット、10ロットのアルミニウム合金材を用意した。各ロットで採取した引張試験片の数は、A6061-T6については各ロットに対して3本、A6N01-T5については各ロットに対して1本、A5083-Oについては1つのロットが4本、2つのロットが各3本、4つのロットが各2本、3つのロットが1本である。引張試験にはJIS 14B号の引張試験片⁹⁾を用い、試験片の中央に2方向のひずみゲージを貼付し、単調引張試験を行った。

a) ヤング係数Eの決定方法

計測された応力-ひずみ関係の測定結果から次の値を計算する。

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \quad (2)$$

ここに、 E_i : i 番目に測定された応力 σ_i とひずみ ε_i から決まるヤング係数の値

σ_i, ε_i : それぞれ、測定された i 番目の応力とひずみ

例として、一体の試験片から得られる E_i と ε_i の関係を図-1に示す。 ε_i が小さい領域で、 E_i の値はばらつくが、 ε_i が大きくなるとこのばらつきは小さくなり、右下がりの直線になり、 ε_i が0.2%耐力に対応するひずみに近づくと、直線は曲がる。直線性が見られる範囲の E_i と ε_i の关系到最小二乗法を適用し、得られ

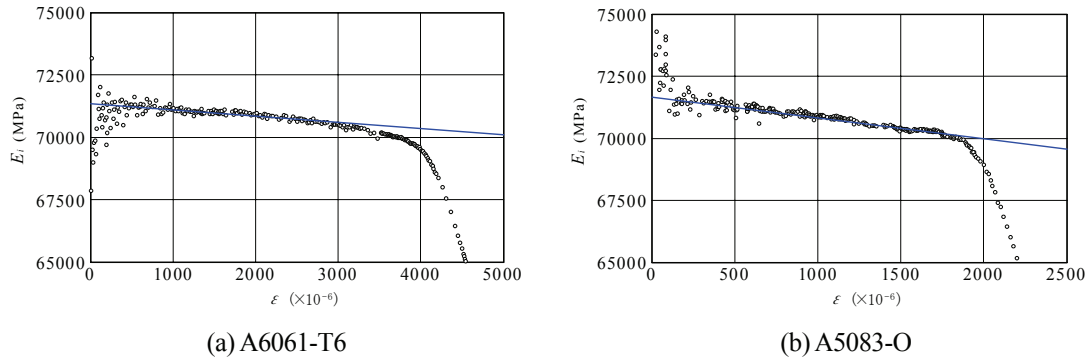


図-1 $E_i - \varepsilon_i$ 関係

た直線の切片の値をヤング係数 E の値とする．このようにして得られたヤング係数は，応力-ひずみ関係の原点における接線係数を表していると考えられる．

b) ひずみ硬化パラメータ n の決定方法

式(1)の右辺第2項の n を決めるために，文献8)に従って，0.1%の塑性ひずみに対応する耐力，すなわち0.1%耐力 $\sigma_{0.1}$ を用いて，

$$0.001 = 0.002 \left(\frac{\sigma_{0.1}}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (3)$$

より， n は次式から決定される．

$$n = \frac{\ln 2}{\ln(\sigma_{0.2}/\sigma_{0.1})} \quad (4)$$

0.1%耐力 $\sigma_{0.1}$ と0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ は，応力-ひずみ関係のグラフ上に，応力が0でひずみが0.001および0.002の点から2. (2). a)項で決定されたヤング係数 E を傾きに持つ直線を引き，この直線と応力-ひずみ関係が交差する点の応力として決定される．

A5083-O では応力-ひずみ関係が階段状になる現象が発生したロットが存在した．この現象は，移動する転位と固溶原子であるマグネシウムの相互作用により発生すると言われており，セレーションと呼ばれる．セレーションが0.2%耐力に達する前に発生すると0.1%耐力が0.2%耐力に等しくなるため，式(4)から分かるように， n は無限大になる．

(3) ヤング係数 E の特性

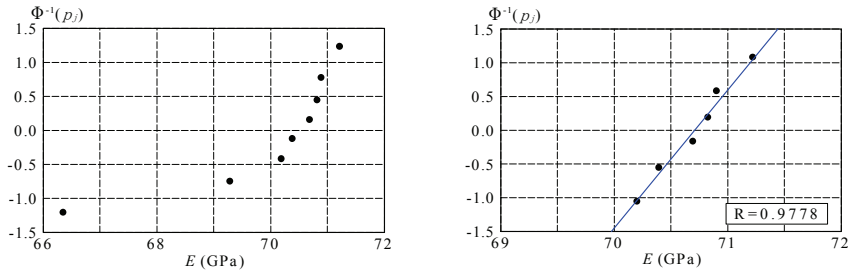
ヤング係数 E はロット間で変化するので，これを確率変数として扱い，変数 E の確率分布を確率紙によって決定した．考慮する確率分布は正規分布と対数正規分布である． E を小さい値から順に並べると，最も小さい値から j 番目の E の値の累積確率 p_j が次式で与えられる¹⁰⁾．

$$p_j = \frac{j}{j_{data} + 1} \quad (5)$$

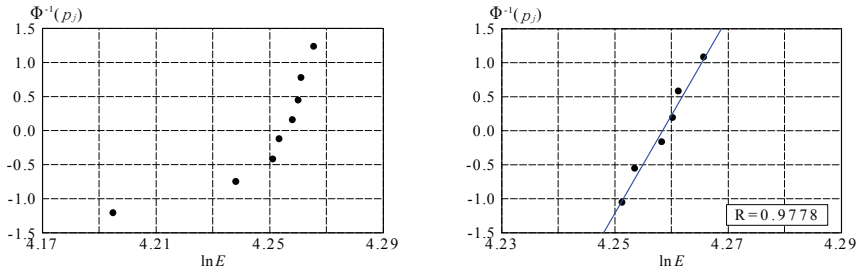
ここに， j_{data} : データの総数

ヤング係数 E の確率紙へのプロットを，6000系アルミニウム合金およびA5083-Oについてそれぞれ図-2，3に示す．ここで各図の縦軸の $\Phi^{-1}(p_j)$ は，標準正規分布の累積分布関数の逆関数である．

図-2(a)と(b)の左図において，左側の2点は直線性を示す右側のプロットの分布から外れている．これら2点を除いて，確率紙にプロットした結果が右図である．図-2(a)と(b)の右図および図-3には，プロット

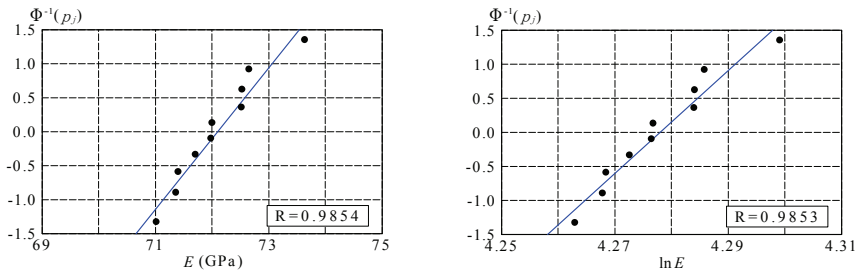


(a) 正規確率紙

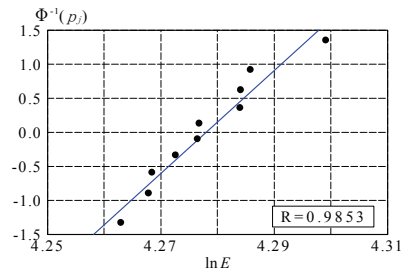


(b) 対数正規確率紙

図-2 6000系アルミニウム合金のヤング係数 E の確率紙へのプロット



(a) 正規確率紙



(b) 対数正規確率紙

図-3 A5083-O のヤング係数 E の確率紙へのプロット

表-1 μ_E と Ω_E の値

アルミニウム合金	μ_E (GPa)	Ω_E
A6061-T6, A6N01-T5	70.95	4.752×10^{-3}
A5083-O	72.09	1.164×10^{-2}

ト点に対して回帰分析によって決められた回帰直線および相関係数が示してある。図-2, 3 の各図において、正規確率紙上と対数正規確率紙上の相関係数がほぼ等しいので、6000系アルミニウム合金およびA5083-Oのヤング係数 E の確率分布として正規分布を採用する。すなわち、 E は次の累積分布関数で表される。

$$F_E(E) = \Phi\left(\frac{E - \mu_E}{\mu_E \Omega_E}\right) \quad (6)$$

ここに、 $F_E(E)$: ヤング係数 E の累積分布関数

μ_E, Ω_E : それぞれ、 E の平均値と変動係数

算出した E の平均値 μ_E と変動係数 Ω_E の値を表-1に示す。ヤング係数の平均値に関して、A5083-Oの方が6000系アルミニウム合金より大きいことが分かる。ヤング係数の変動係数は両アルミニウム合金とも非常に小さい。

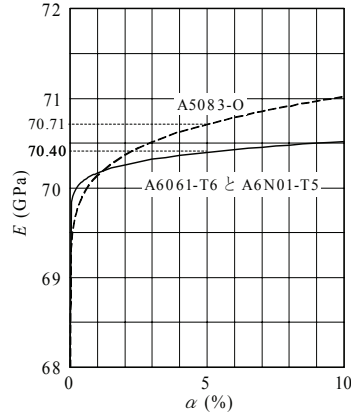


図-4 E と α の関係

E と非超過確率 α の関係が, $F_E(E) = \alpha$ より, 次式で与えられる.

$$E = \mu_E [\Omega_E \Phi^{-1}(\alpha) + 1] \quad (7)$$

この式が与える E と α の関係を図-4 に示す. 土木構造物の設計で用いられる限界状態設計法の強度の特性値に対して, 一般に非超過確率 5% に対する値が採用される. この非超過確率に対するヤング係数 E は, 6000 系アルミニウム合金で 70.40 GPa であり, A5083-O で 70.71 GPa である. 通常, 設計で用いられるヤング係数の値は 70 GPa であり, この値は非超過確率 5% に対するヤング係数より低い. したがって本研究では, 応力-ひずみ関係式に用いるヤング係数 E として 70 GPa を採用する.

6000 系アルミニウム合金の場合, 図-2(a) と (b) の左図において, 左側の 2 点を除いて確率分布が決定された. しかもこれらの点のヤング係数の値は 70 GPa 未満である. これに対する考察は 2. (5) 節で行なう.

(4) ひずみ硬化パラメータ n の特性

ヤング係数 E と同様に, ひずみ硬化パラメータ n もロット間で変化するので, これを確率変数として扱い, 変数 n の確率分布を確率紙によって決定した. 6000 系アルミニウム合金および A5083-O のひずみ硬化パラメータ n の確率紙へのプロットをそれぞれ図-5, 6 に示す. A5083-O で, セレーションが発生したものは, 前述したように, n が無限大になるので, プロットされていない. 各図には, プロット点に対して回帰分析によって決められた回帰直線および相関係数が示してある.

6000 系アルミニウム合金および A5083-O とともに, 対数正規確率紙上の回帰直線に対する相関係数が正規確率紙上のそれより高いので, ひずみ硬化パラメータ n の確率分布として対数正規分布を採用する. すなわち, n は次の累積分布関数で表される.

$$F_n(n) = \Phi\left(\frac{\ln n - \lambda_n}{\xi_n}\right) \quad (8)$$

ここに, $F_n(n)$: ひずみ硬化パラメータ n の累積分布関数

λ_n, ξ_n : それぞれ定数

算出した定数 λ_n と ξ_n の値を表-2 に示す. ひずみ硬化パラメータ n の平均値 μ_n および変動係数 Ω_n は, λ_n および ξ_n と次の関係を有する.

$$\mu_n = \exp\left(\lambda_n + \frac{\xi_n^2}{2}\right) \quad (9)$$

$$\Omega_n = \sqrt{\exp(\xi_n^2) - 1} \quad (10)$$

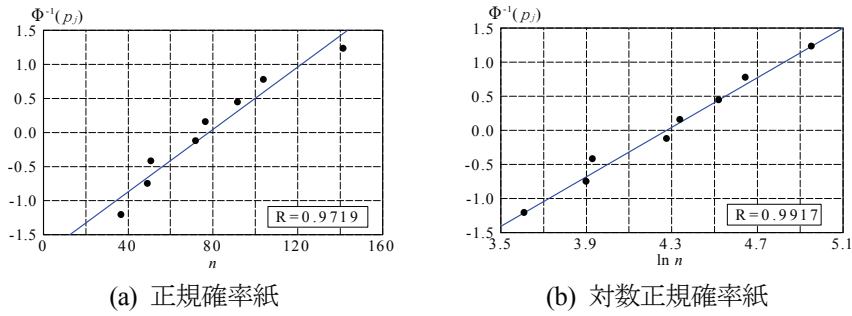


図-5 6000系アルミニウム合金のひずみ硬化パラメータ n の確率紙へのプロット

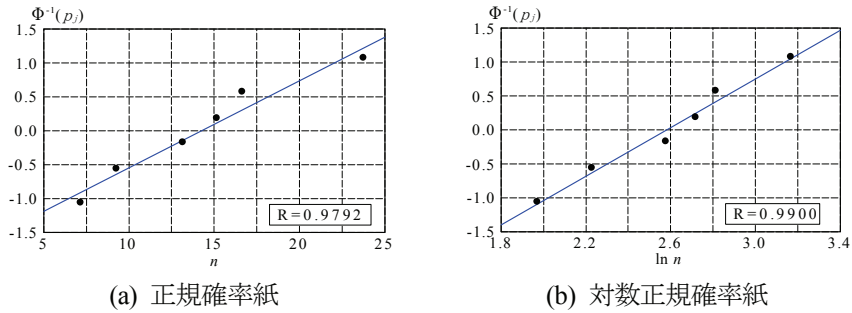


図-6 A5083-O のひずみ硬化パラメータ n の確率紙へのプロット

表-2 λ_n, ξ_n, μ_n および Ω_n の値

アルミニウム合金	λ_n	ξ_n	μ_n	Ω_n
A6061-T6, A6N01-T5	4.275	5.509×10^{-1}	83.66	5.955×10^{-1}
A5083-O	2.583	5.580×10^{-1}	15.47	6.044×10^{-1}

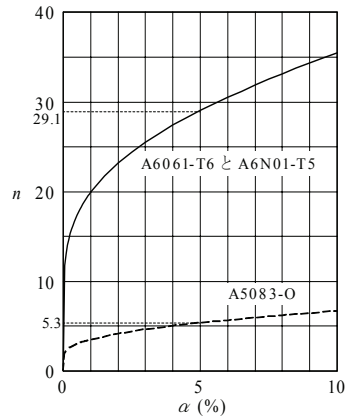


図-7 n と α の関係

これらの関係を用いて計算される n の平均値 μ_n および変動係数 Ω_n の値を表-2 に示す。ひずみ硬化パラメータの平均値に関して、6000系アルミニウム合金の方がA5083-Oより5.4倍大きい。両アルミニウム合金のひずみ硬化パラメータの変動係数はほぼ等しい。しかし、この変動係数はヤング係数の変動係数よりかなり大きい。すなわち、ひずみ硬化パラメータのばらつきはヤング係数のばらつきより大きい。

n と非超過確率 α の関係が、 $F_n(n) = \alpha$ より、次式で与えられる。

$$n = \exp[\xi_n \Phi^{-1}(\alpha) + \lambda_n] \quad (11)$$

この式が与える n と α の関係を図-7 に示す。非超過確率 5% に対するひずみ硬化パラメータは、6000

系アルミニウム合金で 29.1 であり, A5083-O で 5.3 である. したがって本研究では, 応力-ひずみ関係式に用いるひずみ硬化パラメータとして, 6000 系アルミニウム合金に対して 29.1, A5083-O に対して 5.3 を採用する.

(5) 応力-ひずみ関係式と引張試験結果の比較

a) A6061-T6 と A6N01-T5

式(1)のヤング係数 E に 70GPa, ひずみ硬化パラメータ n に 29.1 を用いて, この式が与える応力-ひずみ関係と 6000 系アルミニウム合金の引張試験結果の比較を図-8 に示す. 図-8(a)は, ひずみ硬化パラメータの値が 29.1 に近い試験片 ($E = 71.7$ GPa, $n = 34.3$) に対するものである. 式(1)が与える応力-ひずみ関係が試験結果を全体的によく表している. 図-8(b)は, ひずみ硬化パラメータの値が 29.1 から離れている試験片 ($E = 69.3$ GPa, $n = 142.1$) に対するものである. 式(1)が与える応力は, 0.2%耐力の近くで試験値より幾分低くなる.

2. (3) 節で述べたように, ヤング係数が 70GPa 未満の試験片があった. この試験片 ($E = 66.2$ GPa, $n = 89.5$) と式(1)との比較を図-8(c)に示す. 0.2%耐力より低い範囲で, 式(1)が与える応力が試験値より幾分高くなる領域が存在する. ただし, この差は小さく, この程度の差が板要素や桁構造の耐荷力にどの程度の影響を及ぼすかということは今後の検討課題である.

b) A5083-O

式(1)のヤング係数 E に 70GPa, ひずみ硬化パラメータ n に 5.3 を用いて, この式が与える応力-ひずみ関係と A5083-O の引張試験結果の比較を図-9 に示す. 図-9(a)は, ひずみ硬化パラメータの値が 5.3 に近

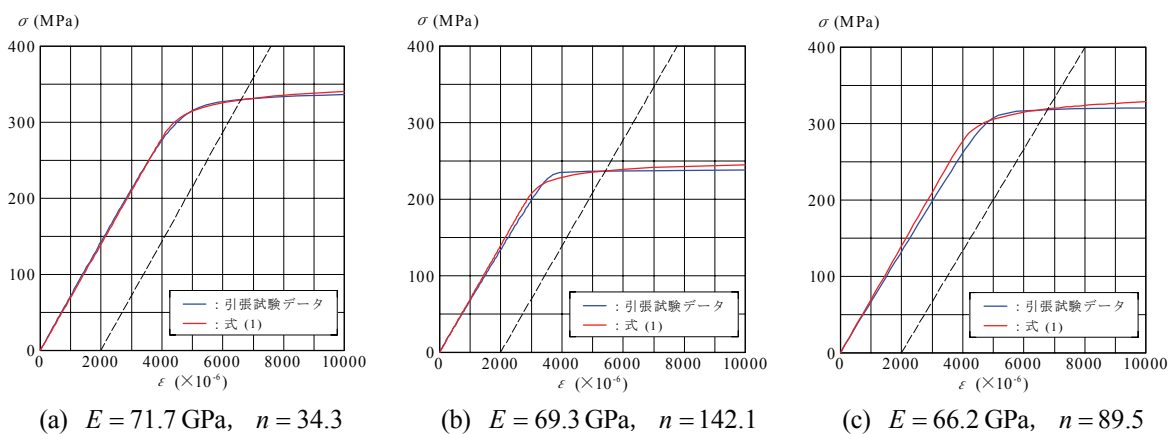


図-8 A6061-T6 と A6N01-T5 の引張試験結果と式(1)の比較

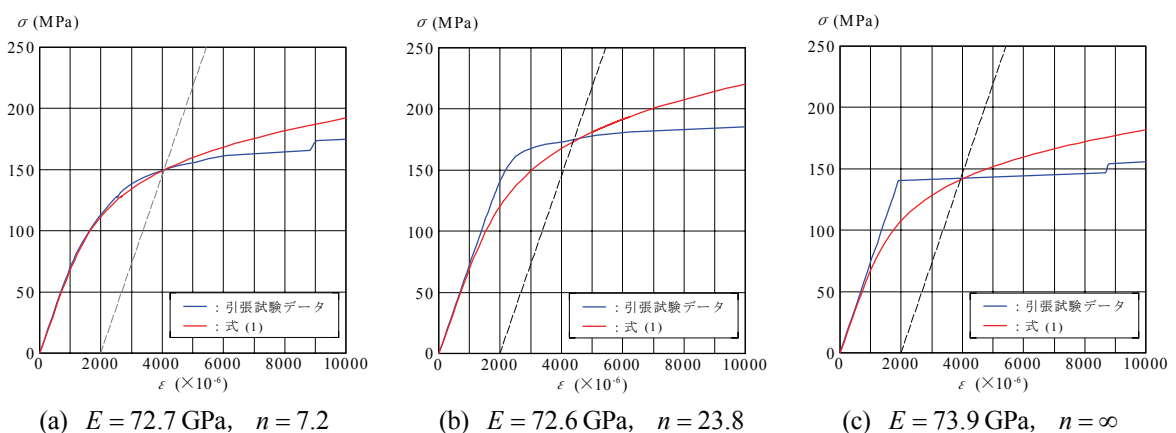


図-9 5083-O の引張試験結果と式(1)の比較

い試験片 ($E = 72.7 \text{ GPa}$, $n = 7.2$) に対するものである。式(1)が与える応力-ひずみ関係は試験結果を全体的によく表している。図-9(b)は、ひずみ硬化パラメータの値が 5.3 から離れている試験片 ($E = 72.6 \text{ GPa}$, $n = 23.8$) に対するものである。式(1)が与える応力は、0.2%耐力より低い範囲で試験値よりかなり低くなるが、0.2%耐力より高い範囲では、試験値より高くなる。

2. (2). b) 項で述べたように、A5083-O ではセレーションが発生したロットが存在した。セレーションが発生した試験片 ($E = 73.9 \text{ GPa}$, $n = \infty$) の応力-ひずみ関係と式(1)との比較を図-9(c)に示す。式(1)は、0.2%耐力より低い範囲で応力が試験値よりかなり低くなるが、0.2%耐力より高い範囲で応力が試験値より高くなる。

c) アルミニウム合金に対する応力-ひずみ関係式

6000 系アルミニウム合金で 70GPa 未満のヤング係数を持つ材料が存在し、耐力の観点から今後検討を要する課題を残しているが、構造用アルミニウム合金に対する応力-ひずみ関係式として次式を提案する。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{70000} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n \quad (\sigma \leq \sigma_{0.2}) \quad (12)$$

$$\sigma = \sigma_{0.2} \quad (\sigma > \sigma_{0.2}) \quad (13)$$

ここに、 n : 6000 系アルミニウム合金に対して 29.1, A5083-O に対して 5.3

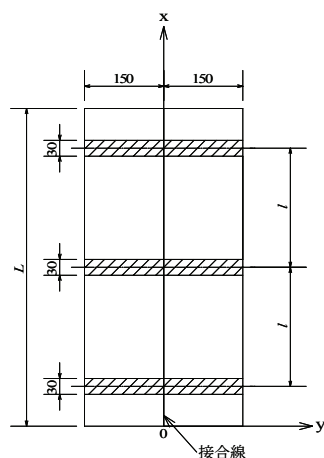
σ と $\sigma_{0.2}$ の単位 : MPa

前述したように、式(1)は 0.2%耐力以下で試験値より低い応力を与えるが、0.2%耐力以上で試験値より高い応力を与える。したがって、 $\sigma > \sigma_{0.2}$ に対して $\sigma = \sigma_{0.2}$ としている。

3. アルミニウム合金の接合部の応力-ひずみ関係

(1) MIG 溶接および摩擦攪拌接合による突合せ継手の製作

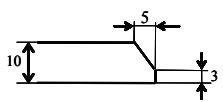
MIG 溶接または摩擦攪拌接合 (FSW) で製作された突合せ継手を図-10 に示す。板厚が 10mm で幅が 150mm の 2 枚の板が突合せで接合されている。A6061-T6, A6N01-T5 および A5083-O のアルミニウム合金板に対して、MIG 溶接と摩擦攪拌接合による突合せ継手をそれぞれ製作した。MIG 溶接の溶接条件と摩擦攪拌接合の接合条件を表-3 に示す。図-10 において斜線が施された部分は、MIG 溶接または摩擦攪拌接合の開始側、中央、終了側であり、この部分から、4 章で述べる、残留応力を調べる試験片を切り出し、両端部分を除いた残りの部分から引張試験片とビッカース硬さを測定する試験片を採取した。

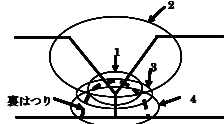


アルミニウム合金	L (mm)	l (mm)
A6061-T6, A5083-O	1200	450
A6N01-T5	1000	400

図-10 突合せ継手

表-3 接合条件
(a) MIG 溶接の接合条件

溶加材	A5183WY φ 1.6mm		
ガス流量	28 l/min		
開先形状			
パス	電流(A)	電圧(V)	速度(mm/min)
1パス	250	29	130
2パス	240	30	70
裏はつり	7~8mm		
3パス	250	28	100
4パス	240	30	70



(b) 摩擦攪拌接合の接合条件

アルミニウム合金	ショルダー径 (mm)	ピン径 (mm)	ツール傾き角度 (°)	ツール回転速度 (rpm)	ツール移動速度 (mm/min)
A6061-T6, A5083-O	※	※	※	800	150
A6N01-T5	20	10	0	700	100

※ 非公開

(2) 接合部の熱影響範囲

MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の熱影響範囲を明らかにするために、接合部のビッカース硬さを測定した。接合線に直角な断面において、板の表裏面から 2mm 内側の位置と板厚中央の位置を 1mm 間隔で測定した。接合部のビッカース硬さの測定結果を図-11 に示す。硬さが低下している領域が熱影響範囲である。A6061-T6 と A6N01-T5 は熱処理アルミニウム合金であるため、接合部で硬さが低下しているが、A5083-O は非熱処理アルミニウム合金であるため接合部で硬さが低下していない。

A6061-T6 と A6N01-T5 の接合部に関して、接合線を中心として左右それぞれに硬さが低下する距離を表-4 に示す。A6061-T6 では摩擦攪拌接合部の熱影響範囲が MIG 溶接部のそれより狭く、A6N01-T5 では MIG 溶接部の熱影響範囲が摩擦攪拌接合部のそれより狭い。熱処理アルミニウム合金の MIG 溶接部の熱影響範囲は 1 インチルールに従うといわれている¹¹⁾。すなわち、MIG 溶接部が強度低下を起こす範囲は、接合線を中心として左右それぞれ 25mm である。この 1 インチルールは、摩擦攪拌接合部が強度低下を起こす範囲としても適用できる。

(3) 接合部の応力-ひずみ関係

a) 接合部の機械的特性

A6061-T6 および A5083-O に関して、母材、MIG 溶接部、摩擦攪拌接合部に対してそれぞれ 3 本、A6N01-T5 に関して、それぞれ 1 本の引張試験片を採取した。母材に関しては、板の長手方向、MIG 溶接部と摩擦攪拌接合部に関しては、突合せ継手の接合線に対して直角な方向に引張試験片を採取した。引張試験片の形状は JIS 14B 号の引張試験片⁹⁾である。引張試験片の中央に、引張試験片の軸に対して直角な方向に接合部が位置する。MIG 溶接部の余盛および摩擦攪拌接合部のバリなどを除去して、平らにした表面にひずみゲージを貼付し、ひずみを測定した。

アルミニウム合金材のミルシートには母材の 0.2%耐力が記載されているが、MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の 0.2%耐力は与えられていない。したがって MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の 0.2%耐力は母材の 0.2%耐力に関連付けられなければならない。そこで次式で定義される、母材の 0.2%耐力に対する接合部の 0.2%耐力の低下率を考える。

$$\eta = \frac{\sigma_{f0.2}}{\sigma_{0.2}} \quad (14)$$

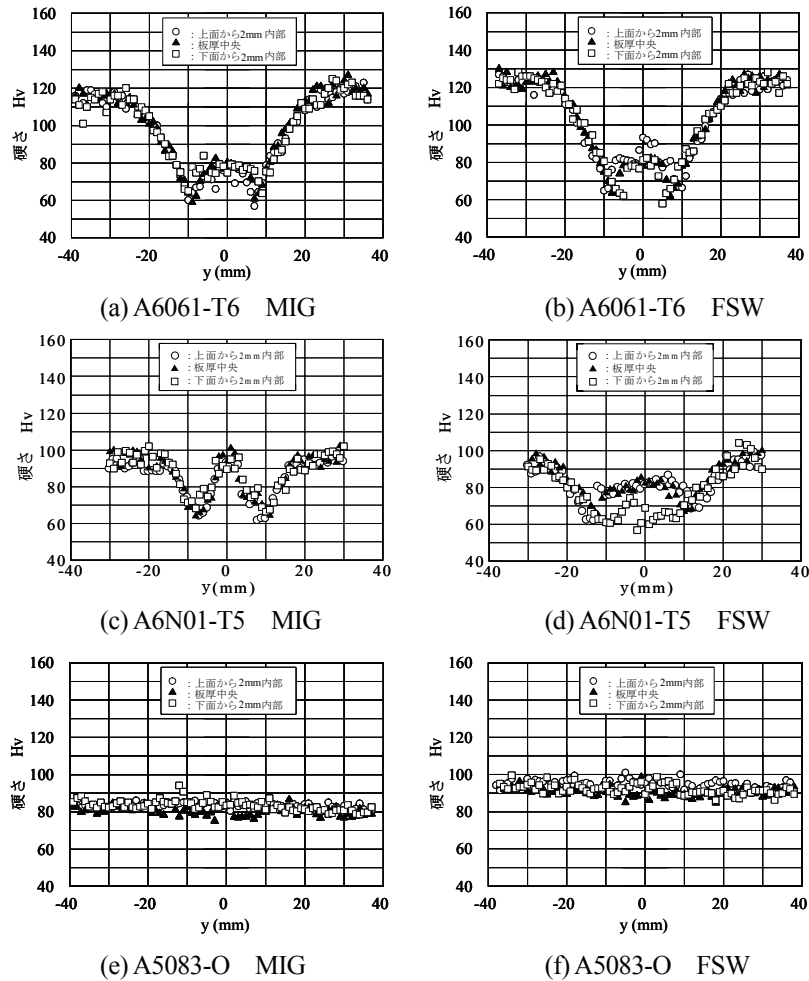


図-11 ビッカース硬さ

表-4 熱影響範囲

アルミニウム合金	MIG	FSW
A6061-T6	25	20
A6N01-T5	20	25

単位：mm

ここに、 η ：母材の0.2%耐力に対する接合部の0.2%耐力の比

$\sigma_{j,0.2}$ ：接合部の0.2%耐力

母材の0.2%耐力および接合部の0.2%耐力を式(14)に代入して得られる結果を表-5に示す。表中の括弧の付いた数値は、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案⁵⁾に規定される母材の0.2%耐力とMIG溶接部の0.2%耐力に対して得られる η の値である。同指針案には摩擦攪拌接合部の0.2%耐力はまだ規定されていない。A6061-T6とA6N01-T5に対して、本研究で得られたMIG溶接部の0.2%耐力の低下率は、アルミニウム合金土木構造物設計・製作指針案において得られる低下率より低い。A6061-T6の場合、摩擦攪拌接合部の0.2%耐力の低下率はMIG溶接部のそれより高いが、A6N01-T5の場合、両者の低下率は同じである。

A5083-Oの場合、MIG溶接部の0.2%耐力の低下率は0.99で1.0に近いが、摩擦攪拌接合部の0.2%耐力は1.13であり、摩擦攪拌接合部の0.2%耐力が母材のそれより高くなっている。この要因として、摩擦攪拌接合によって結晶組織が細粒化することによる摩擦攪拌接合部の強度上昇が考えられる。

表-3の接合条件と異なる接合条件で製作された突合せ継手のMIG溶接部および摩擦攪拌接合部の引張

表-5 η の値

アルミニウム合金	測定値		提案値	
	MIG	FSW	MIG	FSW
A6061-T6	0.39 (0.45)	0.44	0.39	0.44
A6N01-T5	0.45 (0.57)	0.45	0.45	0.45
A5083-O	0.99 (1.00)	1.13	1.00	1.00

表-6 接合部のひずみ硬化パラメータ n の値

アルミニウム合金	MIG	FSW
A6061-T6	5.3	10
A6N01-T5	5.3	10
A5083-O	5.3	5.3

試験をさらに実施して、確率統計学的処理に基づいて接合部の 0.2%耐力の低下率 η の値を決めるべきであるが、現在その様な引張試験データがないので、本研究の結果に基づいて、 η に対して表-5 の値を提案する。A6061-T6 および A6N01-T5 の η の値は、本研究で得られた値を採用している。A5083-O に関しては、本研究で得られた摩擦攪拌接合部の η の値は 1.13 であったが、A5083-O の摩擦攪拌接合部の 0.2%耐力が母材のそれより常に上昇するという事実は現在存在しないので、摩擦攪拌接合部の η の値を 1.0 としている。

b) 接合部の応力-ひずみ関係の定式化

MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の応力-ひずみ関係に対しても Ramberg-Osgood 式を採用し、次式を与える。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{70000} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{j0.2}} \right)^n \quad (15)$$

引張試験から得られた MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部のヤング係数の値は、A6061-T6 に関してそれぞれ 72.8GPa, 70.7 GPa, A6N01-T5 に関してそれぞれ 71.0 GPa, 73.7 GPa, A5083-O に関して 72.5 GPa, 70.7 GPa であった。したがって接合部のヤング係数の値が 70 GPa を下回るものがなかったので、式(15)の右辺第 1 項の分数の分母を 70000 としている。

MIG 溶接部のひずみ硬化パラメータ n の値は、A6061-T6, A6N01-T5, A5083-O に対してそれぞれ 8.3, 6.2, 7.7 であった。MIG 溶接の溶加材はこれらのアルミニウム合金に対して、いずれも A5183[表-3(a)参照]である。溶加材が 5000 系アルミニウム合金であるので、MIG 溶接部のひずみ硬化パラメータ n に対して、2 章で提案した、A5083-O の母材のひずみ硬化パラメータの値 5.3 を採用する。5.3 は、前述の 8.3, 6.2, 7.7 より小さな値であり、構造物の耐荷力を低めに評価する応力-ひずみ関係を与える。

他方、A6061-T6 と A6N01-T5 の摩擦攪拌接合部のひずみ硬化パラメータ n の値はそれぞれ 11.5 と 13.2 であった。これらのアルミニウム合金の母材の n の値は、2 章で提案したように 29.1 であり、A6061-T6 と A6N01-T5 の摩擦攪拌接合部の n の値は母材の値の約 1/3 まで低下する。本研究では、構造物の耐荷力を低めに評価する応力-ひずみ関係を与えるために、11.5 および 13.2 より小さくして、10 を A6061-T6 と A6N01-T5 の摩擦攪拌接合部の n の値として採用する。

A5083-O の摩擦攪拌接合部のひずみ硬化パラメータ n の値は 21.2 であった。この値は、母材の n の値 5.3 より約 4 倍大きい。これは、前述したように、摩擦攪拌接合部の 0.2%耐力が母材のそれより大きかったことに起因していると考えられる。しかし、A5083-O の摩擦攪拌接合部の 0.2%耐力が母材のそれより常に上昇するという事実は現在存在しないので、A5083-O の摩擦攪拌接合部の n の値として、母材の値 5.3 を採用する。接合部のひずみ硬化パラメータ n の値をまとめて表-6 に示す。

式(15)が与える応力-ひずみ関係と引張試験結果の比較を図-12 に示す。式(15)の n には表-6 の値を用

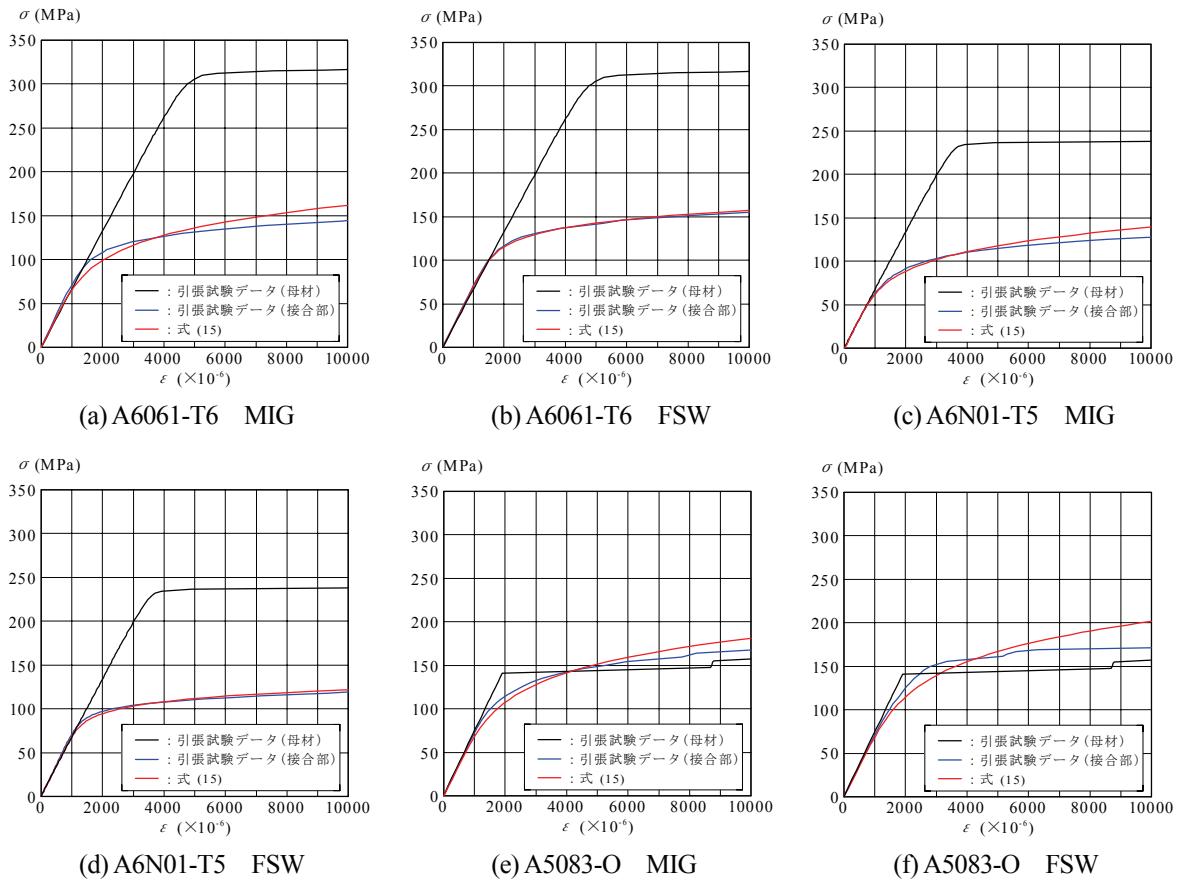


図-12 引張試験結果と式(15)の比較

いている。さらに参考として、図-12には、母材の試験結果も示している。式(15)が与える接合部の応力-ひずみ関係は、0.2%耐力より低い範囲で応力が試験値よりかなり低くなるが、0.2%耐力より高い範囲では応力が試験値より高くなる。

母材の応力-ひずみ関係式と同様に、 $\sigma > \sigma_{0.2}$ に対して安全側になるようにし、さらに式(14)の関係をを用いると、MIG溶接部と摩擦攪拌接合部の応力-ひずみ関係式が次式で表される。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{70000} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\eta \sigma_{0.2}} \right)^n \quad (\sigma \leq \eta \sigma_{0.2}) \quad (16)$$

$$\sigma = \eta \sigma_{0.2} \quad (\sigma > \eta \sigma_{0.2}) \quad (17)$$

4. 接合によってアルミニウム合金に生じる残留応力

(1) 突合せ継手に発生する残留応力

a) 残留応力分布

図-10の突合せ継手の開始側、中央、終了側の各位置において、MIG溶接部の余盛および摩擦攪拌接合のバリなどが除去した後、図-13に示すようにひずみゲージを表裏の同じ位置に貼付した。

残留ひずみは、板を切断することによって開放されるひずみをひずみゲージで測定することによって得た。図-13に示す位置に設置した熱電対により測定した、板の切断時における最高温度は40℃～50℃であ

った。

切断前後のひずみの変化量から次式によって残留応力を求めた。

$$\sigma_{xr} = -\frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y) \quad (18)$$

$$\sigma_{yr} = -\frac{E}{1-\mu^2}(\mu\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (19)$$

ここに、 σ_{xr}, σ_{yr} : それぞれ、接合線(x軸)方向および接合線直角(y軸)方向の残留応力

E : ヤング係数

μ : ポアソン比

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$: それぞれ、接合線(x軸)方向と接合線直角(y軸)方向の切断前後のひずみの変化量

ヤング係数 E とポアソン比 μ に対して、接合中心から25mmまでの範囲には接合部の引張試験から得られた値を用い、25mmより離れた範囲には母材の引張試験から得られた値を用いた。

突合せ継手の中央における残留応力分布を図-14~16に示す。試験結果は板の表裏面の平均値である。 σ_{xr} は、接合中心から約10mmまで大きな引張応力で、25mm~30mmでゼロになり、これより離れたところでは一様に近い圧縮応力になる。 σ_{yr} は、接合線の近くで小さな圧縮または引張応力が生じているが、50mmより離れた位置ではほぼゼロである。

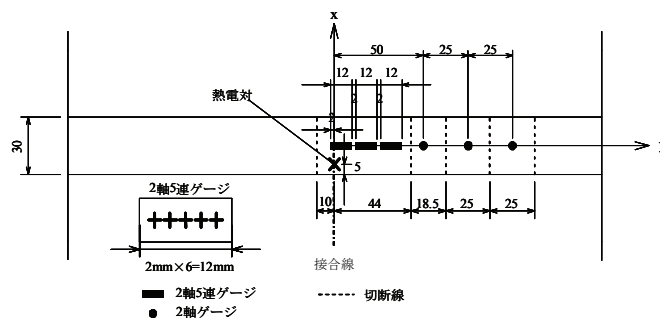


図-13 ひずみゲージの貼付位置と切断位置

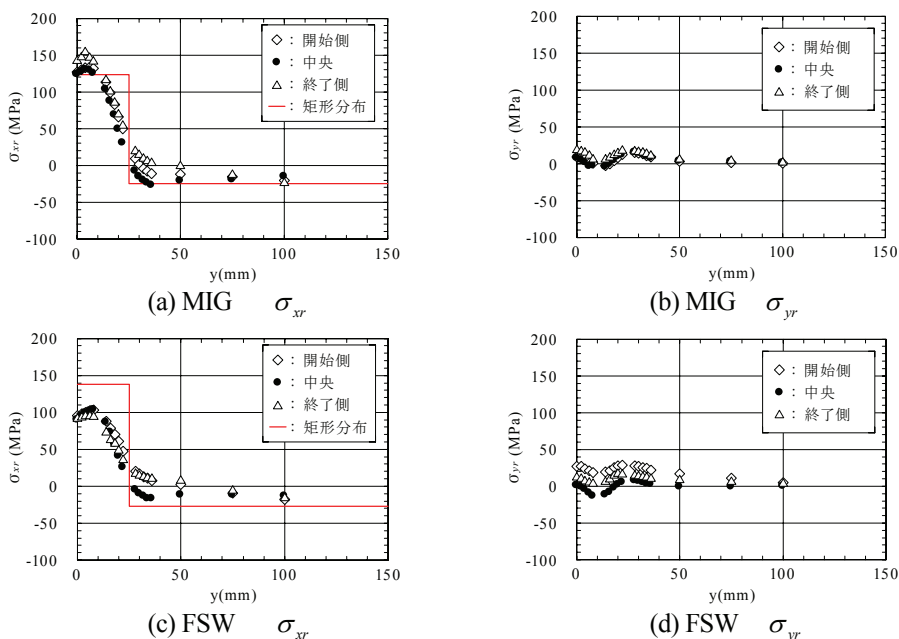


図-14 A6061-T6の残留応力分布

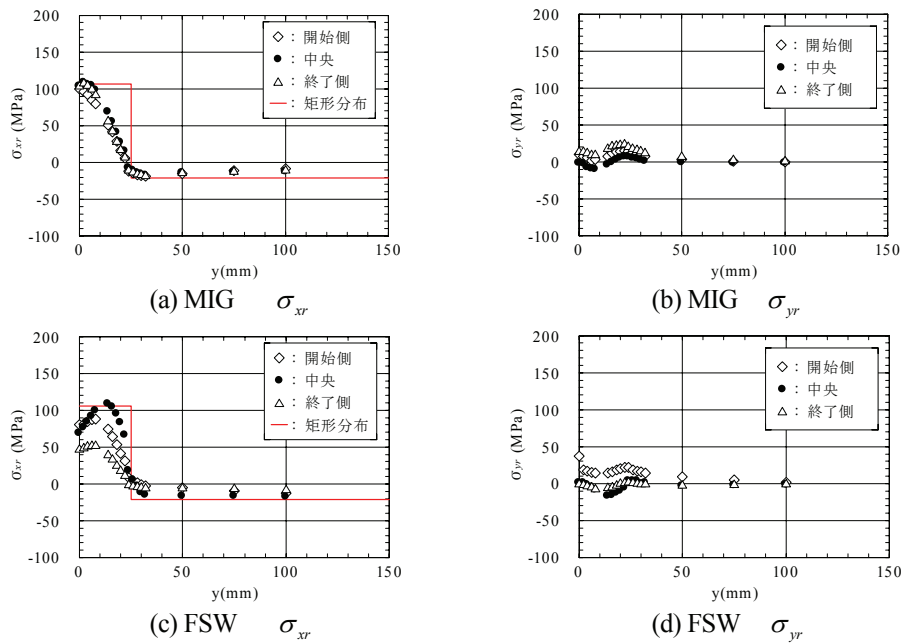


図-15 A6N01-T5 の残留応力分布

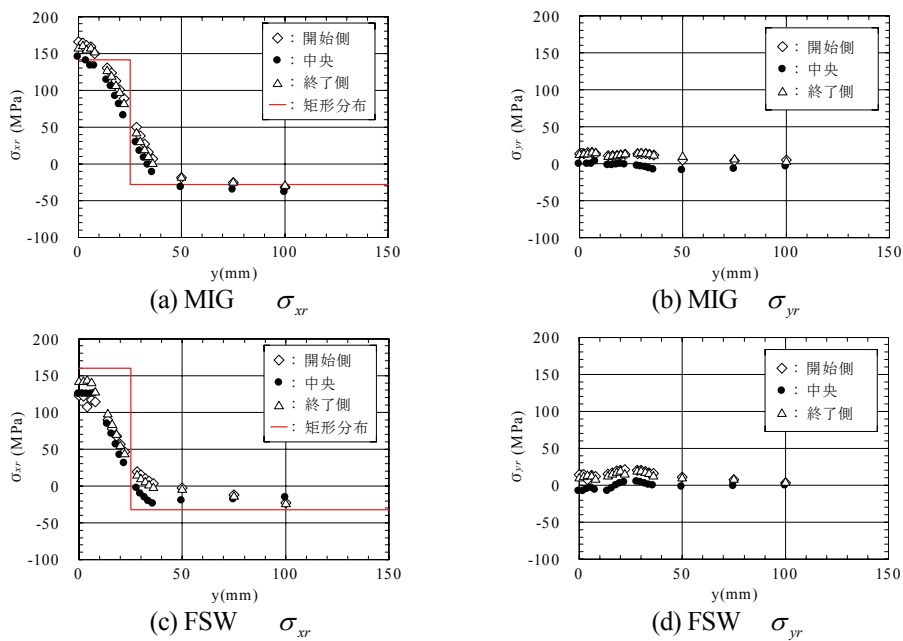


図-16 A5083-O の残留応力分布

表-7 σ_{xr} の引張応力の最大値と接合部の 0.2%耐力 $\sigma_{j0.2}$

アルミニウム合金	MIG				FSW			
	σ_{xr} (MPa)			$\sigma_{j0.2}$ (MPa)	σ_{xr} (MPa)			$\sigma_{j0.2}$ (MPa)
	開始側	中央	終了側		開始側	中央	終了側	
A6061-T6	133.8	130.4	153.9	123.1	103.1	103.5	94.4	137.6
A6N01-T5	99.4	108.5	107.4	107.0	88.3	108.5	51.4	105.5
A5083-O	165.8	144.6	160.0	141.1	122.9	125.2	143.4	160.1

突合せ継手の開始側，中央，終了側の接合線近傍に生じる σ_{xr} の引張応力の最大値を表-7に示す．表の値は，板の表裏面の残留応力の平均値である．同表には接合部の0.2%耐力 $\sigma_{j0.2}$ の値も記載されている．MIG溶接においては，A6061-T6とA5083-Oに対して σ_{xr} が $\sigma_{j0.2}$ より高く，A6N01-T5に対して σ_{xr} は $\sigma_{j0.2}$ にほぼ等しい．摩擦攪拌接合においては，各アルミニウム合金に対して σ_{xr} が $\sigma_{j0.2}$ より低い．

b) 残留応力分布の定式化

接合線方向の残留応力 σ_{xr} は，4. (1). a)項で述べたように，接合中心から約10mmまで大きな引張応力で，25mm～30mmでゼロになり，これより離れたところでは一様な圧縮応力になる．したがって，接合中心から25mmまでは一様な引張残留応力，25mmより離れたところで一様な圧縮残留応力となる矩形分布を仮定する．そして一様な引張残留応力の値に対して接合部の0.2%耐力を用い，引張残留応力の合力と圧縮残留応力の合力が等しくなるという条件から， σ_{xr} の分布に対して，次式で表される矩形分布を得る．

$$\sigma_{xr} = \sigma_{j0.2} \quad (0 \leq y \leq 25\text{mm}) \quad (20)$$

$$\sigma_{xr} = -\frac{25\sigma_{j0.2}}{b-25} \quad (25\text{mm} \leq y \leq b \leq 150\text{mm}) \quad (21)$$

ここに， b ：接合中心から板の材縁までの距離 (mm)

本研究では，幅が150mmの板の突合せ継手の残留応力の測定結果に基づいている．したがって b の適用範囲を150mmまでとしている．式(20)と(21)で表される矩形分布の残留応力と突合せ継手の開始側，中央，終了側の試験結果との比較を図-16に示す．圧縮残留応力が座屈耐力を低下させるので，式(21)が圧縮残留応力の試験結果をよく推定することが求められる．図-16から分かるように，A5083-OのMIG溶接の中央を除き，矩形分布の圧縮残留応力が試験結果を安全側に近似している．したがって，本研究では式(20)と(21)の残留応力分布を提案する．

設計では実物のMIG溶接部および摩擦攪拌接合部の0.2%耐力は分からないので，式(14)の関係を用いることになる．したがって式(20)と(21)へ式(14)をそれぞれ代入して，接合線方向の残留応力 σ_{xr} は次式で推定される．

$$\sigma_{xr} = \eta\sigma_{0.2} \quad (0 \leq y \leq 25\text{mm}) \quad (22)$$

$$\sigma_{xr} = -\frac{25\eta\sigma_{0.2}}{b-25} \quad (25\text{mm} \leq y \leq b \leq 150\text{mm}) \quad (23)$$

接合線直角方向の残留応力 σ_{yr} は，4. (1). a)項で述べたように，接合線の近くで圧縮応力が生じているが，その値は小さく，範囲も狭い．したがって， σ_{yr} がアルミニウム部材の座屈耐力に影響することは無いと考えられるので， σ_{yr} はゼロとする．

5. 結論

本研究では，土木構造物に使用されるA6061-T6，A6N01-T5およびA5083-Oの構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係および，これらのMIG溶接部と摩擦攪拌接合部の応力-ひずみ関係を定式化し，さらにMIG溶接および摩擦攪拌接合によって発生する残留応力を定式化した．本研究で得られた主な結論を次に示す．

- (1) 構造用アルミニウム合金のヤング係数は正規分布で表される．ヤング係数の平均値に関して，A5083-Oの方がA6061-T6とA6N01-T5の6000系アルミニウム合金より大きい．ヤング係数の変動係数はA5083-Oと6000系アルミニウム合金ともに非常に小さい．非超過確率5%に対するヤング係数は，6000系アルミニウム合金で70.40GPaであり，A5083-Oで70.71GPaである．通常，設計で用いられるヤング係数は70GPaであり，この値は，非超過確率5%に対するヤング係数より低い．

- (2) 構造用アルミニウム合金のひずみ硬化パラメータは対数正規分布で表される。ひずみ硬化パラメータの平均値に関して、A6061-T6 と A6N01-T5 の 6000 系アルミニウム合金の方が A5083-O より 5.4 倍大きい。6000 系アルミニウム合金と A5083-O のひずみ硬化パラメータの変動係数はほぼ等しいが、ヤング係数の変動係数よりかなり大きい。非超過確率 5%に対するひずみ硬化パラメータは、6000 系アルミニウム合金で 29.1 であり、A5083-O で 5.3 である。
- (3) 構造用アルミニウム合金の応力-ひずみ関係式を式(12)と(13)で与えた。
- (4) 熱処理アルミニウム合金 A6061-T6 および A6N01-T5 の MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の熱影響範囲は、接合線を中心として両側にそれぞれ 25mm 以下である。
- (5) MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の応力-ひずみ関係式を式(17)と(18)で与えた。接合線を中心として両側にそれぞれ 25mm の範囲に、式(17)と(18)で与えられる応力-ひずみ関係を使用しなければならない。
- (6) 突合せ継手において、MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の接合線方向の残留応力 σ_{xx} に対して、矩形分布の残留応力を式(23)と(24)で与えた。
- (7) MIG 溶接部および摩擦攪拌接合部の、接合線に直角な方向の残留応力 σ_{yy} はゼロと見なすことができる。

謝辞：本研究は、科学技術振興調整費充当戦略的研究拠点「大阪大学フロンティア研究機構」の研究プロジェクト(プロジェクト名：アルミニウム合金構造物実現のための基礎研究，2003～2005)の下で行なわれた。本研究に多大な御協力を賜った故山口進吾氏(株住軽日軽エンジニアリング元取締役)に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大倉一郎，萩澤亘保，岩田節雄，北村幸嗣：アルミニウム橋実現のための技術開発，軽金属，第 54 巻，第 9 号，pp.380-387，2004.
- 2) 塚本健三，末廣本治，中林章，大隅心平：アルミニウム合金製橋梁—JR 川棚駅前広場自由通路橋，橋梁&都市 PROJECT，第 38 巻，第 6 号，pp.4-8，2002.
- 3) 島貫繁吉，山口進吾：資源循環型床版の施工—リサイクル材を利用したアルミニウム合金製床版，橋梁&都市 PROJECT，第 37 巻，第 11 号，pp.5-11，2001.
- 4) 山田雅義，武本頼和：アルミ床板による新加古川大橋拡幅について，大阪大学，阪大フロンティア研究機構，第 1 回アルミニウム合金構造物実現のためのシンポジウム，pp.26-27，2004.
- 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) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編，丸善，2002.
- 7) T. Hoglund and B. Norlin: Static design of aluminium structures, Structural Engineering International, IABSE, Vol.16, No.4, pp.301-304, 2006.
- 8) F.M. Mazzolani: Aluminium Alloy Structures, Second edition, E & FN SPON, pp.59-64, 1995.
- 9) JIS Z 2201：金属材料引張試験片，1998.
- 10) A. H-S. Ang and W. H. Tang：Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol.1, John Wiley & Sons, pp.261-281, 1988.
- 11) M.L. Sharp: Behavior and Design of Aluminum Structures, McGraw-Hill, Inc., pp.65-67, 1993.