アルミニウム合金管/鋼管摩擦圧接継手の
引張強さ特性の統計的解析

川井 五作*・小川 恒一**・時末 光***

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 50, No. 12 (2000), pp. 643-649

Statistical analysis of tensile strength characteristics of
aluminum alloy pipe and steel pipe friction welded joints

Gosaku KAWAI*, Koichi OGAWA** and Hiroshi TOKISUE***

In present study, various aluminum alloys pipe to steels pipe were friction welded, and the mean value and scatter of welded joints were investigated. That is, thirty specimens for each combination of three aluminum alloys pipe to five steels pipe were friction welded under the optimum friction welding condition and the joint efficiency of welded joints were evaluated by tensile test. After performing statistical analysis and Weibull analysis on the joint efficiency, the following results were obtained. (1) The joint efficiency of A6061/steel showed a normal type distribution, but the A5052/steel and A6063/steel showed a distortional type and a double peak type distribution, respectively. (2) A difference was found in the joint efficiency of A5052/carbon steel and A5052/stainless steel showing high joint efficiency in the A5052/S45C and A5052/SUS304. (3) In the A6061/carbon steel and A6061/stainless steel, no difference was found in joint efficiency. (4) In the case of A6063/carbon steel, any difference of the joint efficiency was not found, while a difference was found in the case of A6063/stainless steel. (5) A reference table on the joint efficiency and joint strength for three aluminum alloys pipe to five steels pipe was presented.

(Received March 31, 2000)

Keywords: friction welding, dissimilar material, aluminum alloy, carbon steel, stainless steel, Weibull analysis, joint strength

1. 緒 言

昨今、異材継手の作製には摩擦圧接法が広く適用されている。しかし、材料の組合せや圧接条件によっては、継手強度のばらつきが大きく^{1),2)}、実用に際しては、それぞれの材料の組合せの継手性能とその信頼性を検討しておく必要がある。そこで本研究では、中実材に比べ圧接条件が接合性により敏感に反映する管形状³⁾のアルミニウム合金と炭素鋼、およびアルミニウム合金とステンレス鋼の摩擦圧接を行い、それらの継手強度を統計処理することにより、継手効率の差異とそのばらつきを検討した。さらに、ワイブル解析を行うことにより、この種の異材管継手の信頼性データを提供し、材料選択の指針を与えることを目的とした。

2. 供試材および実験方法

供試材の一方は、接合性の比較的良好な A5052-H34, A6061-T6, A6063-T5 の 3 種のアルミニウム合金とし、相手材としては S25C, S45C 炭素鋼, SUS304, SUS430, SUS403 ステンレス鋼を選定した。Table 1 および Table 2 はそれらの化学成分と機械的性質である。これらの供試材を、アルミ

ニウム合金は長さ120 mm、外径20 mm、内径14 mmの管形状に、炭素鋼とステンレス鋼は長さを40 mmでアルミニウム合金と同径の管形状に機械加工し、制動式摩擦圧接機を用いて圧接した。

適用した摩擦圧接条件は、各アルミニウム合金管と S25C 管の最適圧接条件³⁾を S25C と S45C 炭素鋼管に、各アルミニウム合金管と SUS304 管のそれ⁴⁾を SUS304, SUS430, SUS403 ステンレス鋼管にも適用し、それぞれ30本の継手を作製した。適用した摩擦圧接条件を Table 3 に示す。圧接後、内外のバリを除去した平滑試験片で引張試験を行い、アルミニウム合金母材に対する継手効率を求めた。なお、本圧接条件は同じ鋼種では、それぞれの最適圧接条件の範囲内にあることを確認している。

次いで基本統計量を算出し、継手効率の分散と平均値の検定を行い、鋼種の違いによる継手強度の差異を求めるとともに、強度分布のヒストグラムを作成した。これらの分布形態は常に正規型分布を示すとは限らず、むしろ歪んだ形態を呈することが多く⁵⁾、基本統計量のみでの比較は困難である。そこで、ワイブル解析によって継手強度を比較検討した。

* 大阪産業大学工学部機械工学科 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)。Faculty of Engineering, Osaka Sangyo University (3-1-1, Nakagaito, Daito-shi, Osaka 574-8530).

** 大阪府立大学総合科学部 (堺市)。College of Integrated Arts and Sciences, Osaka Prefecture University (Sakai-shi, Osaka).

*** 日本大学生産工学部 (習志野市)。College of Industrial Technology, Nihon University (Narashino-shi, Chiba).

Table 1 Chemical compositions of base materials (mass%)

(a) Aluminum alloy

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ti+Zr	Bi	Pb	Al
A5052-H34	0.10	0.14	0.01	0.03	2.46	0.20	0.01	0.01	—	—	—	RE
A6061-T6	0.58	0.16	0.20	0.01	0.99	0.07	0.01	0.01	—	—	—	RE
A6063-T5	0.43	0.13	0.01	0.00	0.51	0.00	0.00	0.00	—	—	—	RE

(b) Carbon steel

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe
S25C	0.22	0.22	0.04	0.017	0.014	0.08	0.040	0.14	RE
S45C	0.45	0.27	0.72	0.022	0.016	0.04	0.045	0.09	RE

(c) Stainless steel

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304	0.04	0.30	1.57	0.034	0.018	8.55	18.15
SUS430	0.04	0.18	0.24	0.027	0.010	0.28	16.13
SUS403	0.15	0.42	0.59	0.028	0.024	0.32	11.68

3. 実験結果および考察

3.1 基本統計量とヒストグラム

Table 4は引張強さから求めたアルミニウム合金母材に対する継手効率 ψ の基本統計量である。これらの継手効率の分散 σ^2 と平均値 μ の検定を以下のように行った。分散は2標本を使ったF検定であり、すべて有意水準5%の両側検定を行った。

これらの結果より、A5052合金管と炭素鋼管、A6061合金管と炭素鋼管では分散に差異は認められないが、A6063合金管と炭素鋼管には差異が認められた。また、ステンレス鋼種間の分散の差異は認められない。

次いで、上述の分散の検定結果を踏まえて等分散を仮定した2標本によるt検定を行い、平均値 μ の差異を検定した。(ただし、A6063合金管と炭素鋼種間のみ等分散を仮定しない2標本によるt検定を行った。)

検定の結果は、A5052合金管と炭素鋼管の継手効率の平均値間では、

$$\mu_{S25C} \neq \mu_{S45C}$$

A6061合金管と炭素鋼管の継手効率の平均値間では、

$$\mu_{S25C} = \mu_{S45C}$$

A6063合金管と炭素鋼管の継手効率の平均値間では、

$$\mu_{S25C} = \mu_{S45C}$$

となった。同様にステンレス鋼種間では、A5052合金管とステンレス鋼管の継手効率の平均値間では、

$$\mu_{SUS304} \neq \mu_{SUS430}, \mu_{SUS304} \neq \mu_{SUS403}, \mu_{SUS430} \neq \mu_{SUS403}$$

A6061合金管とステンレス鋼管の継手効率の平均値間では、

$$\mu_{SUS304} = \mu_{SUS430}, \mu_{SUS304} = \mu_{SUS403}, \mu_{SUS430} = \mu_{SUS403}$$

A6063合金管とステンレス鋼管の継手効率の平均値間では、

$$\mu_{SUS304} = \mu_{SUS430}, \mu_{SUS304} \neq \mu_{SUS403}, \mu_{SUS430} \neq \mu_{SUS403}$$

となった。

Table 2 Mechanical properties of base materials

(a) Aluminum alloy

Material	Proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile stress σ_B (MPa)	Elongation ε (%)	Vickers hardness HV (0.2)
A5052-H34	254	259	19.0	94
A6061-T6	284	301	18.8	110
A6063-T5	125	160	31.0	64

(b) Carbon steel

Material	Yield stress σ_{US} (MPa)	Tensile stress σ_B (MPa)	Elongation ε (%)	Vickers hardness HV (0.2)
S25C	282	465	30.1	156
S45C	422	727	19.0	213

(c) Stainless steel

Material	Proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile stress σ_B (MPa)	Elongation ε (%)	Vickers hardness HV (0.2)
SUS304	441	641	57.0	180
SUS430	308	675	23.0	181
SUS403	472	708	25.0	170

Table 3 Friction welding conditions

Material		Friction pressure P_1 (MPa)	Upset pressure P_2 (MPa)	Friction time t_1 (s)	Rotational speed N (s ⁻¹)
A5052	carbon steel	10	100	2	33.3
	stainless steel	20	60	1	50.0
A6061	carbon steel	20	140	1	50.0
	stainless steel	20	120	1	50.0
A6063	carbon steel	10	80	1	50.0
	stainless steel	20	100	1	66.7

Table 4 Basic statistics of joint efficiency

(a) A5052/steel

Material	S25C	S45C	SUS304	SUS430	SUS403
Mean value, μ (%)	44.0 $\pm$ 3.3	50.3 $\pm$ 2.8	57.9 $\pm$ 3.4	50.6 $\pm$ 4.9	44.1 $\pm$ 3.5
Variance, σ^2	80.2	55.5	83.1	174.1	89.7
Coefficient of variation, CV	0.204	0.148	0.157	0.261	0.215

(b) A6061/steel

Material	S25C	S45C	SUS304	SUS430	SUS403
Mean value, μ (%)	69.6 $\pm$ 2.6	70.1 $\pm$ 2.0	73.0 $\pm$ 2.9	73.1 $\pm$ 1.8	72.0 $\pm$ 1.8
Variance, σ^2	48.2	28.8	6.6	24.0	23.0
Coefficient of variation, CV	0.100	0.077	0.035	0.067	0.067

(c) A6063/steel

Material	S25C	S45C	SUS304	SUS430	SUS403
Mean value, μ (%)	81.8 $\pm$ 4.9	88.8 $\pm$ 1.4	68.0 $\pm$ 8.1	69.2 $\pm$ 11.9	51.2 $\pm$ 11.1
Variance, σ^2	171.0	13.4	470.7	1011.2	886.6
Coefficient of variation, CV	0.160	0.041	0.319	0.460	0.582

Fig. 1~Fig. 3はそれぞれA5052/鋼, A6061/鋼, そしてA6063/鋼の継手効率のヒストグラムである。A5052/鋼の場合, S25CとSUS304は正規型分布を示しているが, その他のS45C, SUS403とSUS430ではややマイナス歪形態となっている。A6061/鋼では, 炭素鋼, ステンレス鋼の種類による分布形態に相違は見られない。一方, A6063/S25Cでは継手効率の極度に低いものが2個存在するが, その他は91.4%と高い値に集中している。A6063/S45Cはほぼ正規型分布を示した。A6063/SUS304は継手効率 ψ が99.0%以上の高い値に多数本みられるが, 分布はなだらかに広がり, ばらつきが大きい。A6063/SUS403とA6063/SUS430の分布は広範で, ピークが2箇所存在する双峰型分布形態である。

3.2 ワイブル解析

継手効率の分布形態はすべてが正規型とは限らない。とく

に, A6063/ステンレス鋼の場合, 双峰型分布を呈した。そこで, 正規型分布ではなく裾を引いた歪んだ分布の場合, 通常の統計解析で平均値や分散を一律的に求めて比較することは不適切であるので, ワイブル解析を行いワイブル基本統計量を求めた⁶⁾。

ここで, ワイブル解析にはFig. 1~Fig. 3のヒストグラムを用いて相対累積度数 $F(T_i)$ を求め, これをワイブル確率紙にプロットし, ワイブル3母数を求めた⁷⁾。Fig. 4~Fig. 6はそれぞれA5052, A6061, A6063合金と炭素鋼, ステンレス鋼のワイブルプロットの結果である。A5052とA6061はすべて1本の直線で示されるが, Fig. 6(a), (c)~(e)のA6063/S25CとA6063/ステンレス鋼は複合ワイブル形態となり, 2本の直線 $F_1(t)$, $F_2(t)$ となる。それらを個々に求め再度プロットしたのがFig. 7である。この場合, サンプル数が少な

Fig. 1 Histograms of joint efficiency of A5052/carbon steel pipe and A5052/stainless steel pipe joints.

Fig. 2 Histograms of joint efficiency of A6061/carbon steel pipe and A6061/stainless steel pipe joints.

Fig. 3 Histograms of joint efficiency of A6063/carbon steel pipe and A6063/stainless steel pipe joints.

くヒストグラムが描けない(b)~(d)の場合は、縦軸に相対累積度数に替えてメディアンランクを用い、総数をプロットした。また、(a)は $F_1(t)$ の個数が2個と少なくプロットができないので割愛し、1本の直線のみを示した。

これらの直線より、ワイブル3母数(m :形状パラメータ, α :尺度パラメータ, γ :位置パラメータ)を求め、式(1), (2)を用いて平均値 μ , 分散 σ^2 を求め、変動係数CVを算出

したのがTable 5である。

$$\mu = \alpha^{1/m} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \alpha^{2/m} \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right\} \quad (2)$$

Fig. 8~Fig. 10は式(3)を用いたワイブル確率密度分布 $f(x)$ である。

$$f(x) = \frac{m(x-\gamma)^{m-1}}{\alpha} e^{-(x-\gamma)^m/\alpha} \quad (3)$$

Fig. 8はA5052の場合で、炭素鋼を比較するとS45Cの方がS25Cより平均値で約15%ほど高く、分散が低い結果となった。ステンレス鋼ではSUS304の平均値が最大で約60%であり、他のステンレス鋼は低く、分散も大きい。Fig. 9はA6061の場合である。A6061の炭素鋼は平均値は同じ値であるが、分散はS25Cの方が大きい。ステンレス鋼は平均値、分散ともに同じ値であり、ステンレス鋼種間の差異は認められない。

Fig. 10はA6063の場合である。炭素鋼は平均値が高く、分散も低く接合性は良好である。一方、ステンレス鋼は複合型ワイブル形態であり、確率密度分布は双峰形となった。ステンレス鋼においては継手効率の高いものが多く含まれる傾向にあるが、分散が大きく、継手効率が安定した良好な継手を得ることができない。

A6063/ステンレス鋼継手はワイブルプロットが二つに折れる複合ワイブル形態を示したが、30個の継手には圧接後の

Fig. 4 Weibull plots of joint efficiency of A5052/carbon steel pipe and A5052/stainless steel pipe joints.

Fig. 5 Weibull plots of joint efficiency of A6061/carbon steel pipe and A6061/stainless steel pipe joints.

Fig. 6 Weibull plots of joint efficiency of A6063/carbon steel pipe and A6063/stainless steel pipe joints.

Fig. 7 Complex Weibull plots of joint efficiency of A6063/carbon steel pipe and stainless steel pipe joints.

Fig. 8 Probability density distribution of joint efficiency of A5052/steel pipe joints.

Fig. 9 Probability density distribution of joint efficiency of A6061/steel pipe joints.

概観上 (ばりの形状) の差異はなく、内ばりにも変化は観察されない。しかし引張試験の結果、引張強さの値に関係なくすべてがアルミニウム合金母材破断であるが、その破面に顕著な差異があった。Fig. 11は継手効率の低い分布に相当する A6063/SUS430の破断面の一例である。(a)はステンレス鋼側に付着残存したアルミニウム合金の SEM 写真である。明瞭に領域ⅠとⅡは区分され、明らかに性質の違いが見られる。(b)は同破断面を軸心に沿って切断したものであり、これも明瞭に領域ⅠとⅡは区分される。そこで、領域Ⅰの部分とⅡの部分の X 線回折を行ったが、明瞭な差異は確認されず、生成された合金層の違いは特定できない。引張破断面の形状より、引張応力下で領域Ⅰは伸びるが、領域Ⅱは伸びが小さいという差異があり、引張強さが低くなったものと考えられる。他方、継手効率の高い分布に相当する継手の破断面

Fig. 10 Probability density distribution of joint efficiency A6063/steel pipe joints.

には領域Ⅱは観察されず、全域が領域Ⅰである。

そこで次に、この継手のアルミニウム合金側を軸心に沿って切断し、硬さを測定した。Fig. 12は断面の外表面と内表

Fig. 11 SEM image of the tensile fractured surface (stainless steel side). (a) SEM image observed at a right angle to the tensile fractured surface. (b) SEM image observed at a transverse direction to the tensile fractured surface.

Fig. 12 Vickers hardness with distance from the weld interface of A6063/SUS430 pipe joint (A6063 side).

面から0.1 mm 内部に入った点と、肉厚中心部の3箇所のビッカース硬さである。(a) Type A と (b) Type B は代表的な硬さ分布の例で、Type A は Type B に比べ、管の厚さ方向における硬さにばらつきがあり、断面の内外部に比べ中心部

は硬さが低い。このようにアルミニウム合金管断面中に硬さの差異が存在することは、引張応力下で異なる破壊様式が発生することになり、最大応力が低下したものと判断される。一定に仕上げた圧接面のもとで、一定の圧接条件で圧接しても、以上のように材種によって強度のばらつきに顕著な差異が認められるが、そのメカニズムについては今のところ明確ではない。しかしながら、こうしたばらつきが生じることは事実であり、実用に際しては、継手強度のばらつきを統計的に検討しておく必要があることが本研究において明らかになった。どの程度のばらつきが実用に際して許容されるのかは、実情に応じて変わらなれ、さらに、圧接条件のわずかな差異によってばらつきが変化する可能性もあるので、今後それらの諸点について信頼度関数⁸⁾の観点からさらに詳細に検討する予定である。

3.3 各組合せ材の接合性

Table 6 および Table 7 は3種類のアルミニウム合金管と5種類の鋼管との継手効率と、引張強さを表したものである。継手効率 ψ で比較すると90%以上の高い値を示したものはA6063管とS25C, S45C, SUS304, SUS430の組合せであり、次いでA6063管とSUS403の組合せが80~90%である。また、A6061は全鋼種に対して $\psi=70\sim80\%$ の安定した値を示した。A5052ではS45C, SUS304, SUS430が60~70%を示した。

A6063は高い継手効率を示すが、母材自体の引張強さが低いので、高強度材としての使用には不適である。そこで、これらを引張強さ σ_B で比較すると、A6061の場合、全鋼種に対して210 MPaが得られた。次いで、A6063も全鋼種に対してほぼ同じ値であり、120~150 MPaが得られた。A5052は鋼種により明瞭な差異があり、SUS304との組合せでは150~180 MPa, S25C, S45C と SUS430 の組合せでは120~150 MPa, SUS403との組合せは最も低く90~120 MPaであった。しかし、この最低値でも工業用純アルミニウムの引張強さを超えており、工業的な利用が考えられる。

4. 結 言

最適摩擦圧接条件下で1条件当たり30本のA5052, A6061, A6063管とS25C, S45C, SUS304, SUS430, SUS403管の摩擦圧接を行い、引張試験で引張強さと継手効率を求めた。それらを統計処理することにより以下の結果を得た。

(1) 継手効率の分布は、A6061の場合にはほぼ正規型分布を示すが、A5052では歪型分布であり、A6063は双峰型分布を示す傾向がある。

(2) A5052と炭素鋼、A5052とステンレス鋼の間に継手効

Table 5 Weibull analysis of joint efficiency

(a) A5052/steel

Material	S25C	S45C	SUS304	SUS430	SUS403
Shape parameter, m	5.2	6.7	10.6	4.2	5.6
Scale parameter, α	5.21×10^8	3.86×10^{11}	1.10×10^9	2.06×10^7	7.67×10^8
Location parameter, γ	0	0	0	0	0
Mean value, μ	43.7	50.0	59.7	50.1	35.7
Standard variance, σ^2	2.0	1.4	0.7	0.7	1.4
Coefficient of variation, CV	0.032	0.024	0.014	0.017	0.033

(b) A6061/steel

Material	S25C	S45C	SUS304	SUS430	SUS403
Shape parameter, m	11.8	18.0	37.5	22.5	23.7
Scale parameter, α	1.30×10^{22}	4.12×10^{33}	1.07×10^{70}	1.63×10^{42}	2.15×10^{44}
Location parameter, γ	0	0	0	0	0
Mean value, μ	71.7	71.6	72.6	73.4	72.5
Standard variance, σ^2	0.7	0.3	0.1	0.2	0.2
Coefficient of variation, CV	0.012	0.008	0.004	0.006	0.006

(c) A6063/steel

Material	S25C	S45C	SUS304	SUS430	SUS403
Shape parameter, m	34.6 —	30.0	24.0 3.2	10.3 3.9	3.7 2.0
Scale parameter, α	2.28×10^{67} —	5.75×10^{58}	1.65×10^{47} 4.23×10^5	1.71×10^{20} 3.03×10^5	1.22×10^7 7.50×10^2
Location parameter, γ	0	0	0	0	0
Mean value, μ	87.1 —	89.3	90.7 51.3	87.8 23.0	74.2 24.3
Standard variance, σ^2	0.1 —	0.2	0.2 5.4	1.1 1.7	6.1 5.9
Coefficient of variation, CV	0.004 —	0.004	0.005 0.045	0.012 0.057	0.033 0.100

Table 6 Joint efficiency of steel pipes and aluminum alloy pipes under the optimum welding condition

Steel \ Aluminum alloy	A5052	A6061	A6063
S25C	◆	☆	◎
S45C	◇	☆	◎
SUS304	◇	☆	◎
SUS430	◇	☆	◎
SUS403	◆	☆	○

◎ : $90 \leq \psi < 100(\%)$, ○ : $80 \leq \psi < 90(\%)$,
 ☆ $70 \leq \psi < 80(\%)$, ◇ : $60 \leq \psi < 70(\%)$, ◆ : $\psi < 60(\%)$

Table 7 Joint strength of steel pipes and aluminum alloy pipes under the optimum welding condition

Steel \ Aluminum alloy	A5052	A6061	A6063
S25C	◇	◎	◇
S45C	◇	◎	◇
SUS304	☆	◎	◇
SUS430	◇	◎	◇
SUS403	◆	◎	◇

◎ : $210 \leq \sigma_B(\text{MPa})$, ○ : $180 \leq \sigma_B < 210(\text{MPa})$,
 ☆ : $150 \leq \sigma_B < 180(\text{MPa})$, ◇ : $120 \leq \sigma_B < 150(\text{MPa})$,
 ◆ : $90 \leq \sigma_B < 120(\text{MPa})$

率の差異があり、それぞれ S45C と SUS304 の継手効率が低い。

(3) A6061 と炭素鋼, A6061 とステンレス鋼の間に継手効率の差異は認められない。

(4) A6063 と炭素鋼の間には継手効率の差異はないが, A6063 とステンレス鋼の間には継手効率の差異があり, SUS304 と SUS430 の継手効率が高い。

(5) 3 種のアルミニウム合金と 5 種の鋼とを組合せた引張強さと継手効率を調べ、圧接性を表にまとめることができた。それによると継手効率では A6063 と S25C, S45C, SUS304, SUS430 の組合せが良好で、引張強さから見ると A6061 と全鋼種の組合せが良好とみなされる。

参 考 文 献

- 1) 川井五作, 小川恒一, 加藤数良, 時末 光: 溶接学会全国大会講演概要, 59 (1996), 236.
- 2) 川井五作, 小川恒一, 時末 光: 軽金属学会第91回秋期大会講演概要, (1996), 233.
- 3) 川井五作, 小川恒一, 越智 秀, 時末 光: 軽金属溶接, 37 (1999), 295.
- 4) 川井五作, 小川恒一, 越智 秀, 時末 光: 軽金属, 49 (1999), 83.
- 5) G. Kawai, K. Ogawa, R. Tsujino and H. Tokisue: J. of The Japanese Society for Strength and Fracture of Materials, 33 (1999), 1.
- 6) 財団法人日本科学技術連盟編: 信頼性データの解析, (1991), 1.
- 7) 前出文献 6), 21.
- 8) JIS Z8115 (1981).