

<論文>

(受理：平成5年6月4日)

破壊強度分布に関する研究

橋本 慶浩^{*}, 江口 伸^{**}, 原賀 康介^{***}, 野中 保雄^{**}

要 旨

接着系の破壊強度が従う分布型を検討するためにいくつかの接着系を選び、引張りせん断試験から得られた破壊強度データの統計的整理を行った。分布型として正規分布・ワイブル分布・最小極値分布・最大極値分布・ベータ分布の5つの分布型を選び、統計的に整理された破壊強度データの各分布型への当てはめを試みた。さらにRMRSS, χ^2 値あるいはAIC統計量を用いた適合度検定を行うことによって各分布型への適合性を評価した。その結果、接着系の破壊強度分布が、常に特定の分布型に当てはまるものではなく、接着系を構成する被着材、接着剤に大きく依存することが認められた。このことは、接着系の信頼性を適正に評価する上で破壊強度分布を知ることが必要であることを示唆している。

1. 緒 言

近年、接合のニーズの多様化にともなって宇宙環境・高温環境あるいは非常に高い寸法精度を必要とするなど、様々な条件下での接着剤の使用が求められるようになってきている^{1,2)}。このような、要求条件の高い使用では接着部の剥離・脱落などによる接着系の破壊はシステム全体の機能に大きな影響を及ぼすことが考えられる。このため、使用条件に適合した接着剤を使用するためには、接着系の信頼性が適正に評価されている必要がある。この信頼性は、JIS Z 8115によれば「アイテムが与えられた条件で、規定の期間中、要求された機能を果たすことができる性質」と定義されている。これは、接着系では与えられた条件の下で規定の期間中、接着系が破壊しない性質、と言い換えることができる。この信頼性評価の必要性は、Fig. 1を用いて容易に説明することができる。Fig. 1は、負荷応力に対する接着系の破壊確率を示したものであり、縦軸は確率密度である。異なる

破壊強度分布を持つ接着系AおよびBが与えられており、それぞれの平均破壊強度を μ_A および μ_B とし、 $\mu_A > \mu_B$ であったとする。この場合どの必要強度に対しても接着系Aの信頼性が接着系Bに比較して高いとは限らない。例を挙げるならば、Fig. 1に示すように、ある必要強度Pが与えられているとき接着系AおよびBが必要強度までに破壊する確率は、必要強度P以下の下側確率として与えられる。したがって、この場合は系B

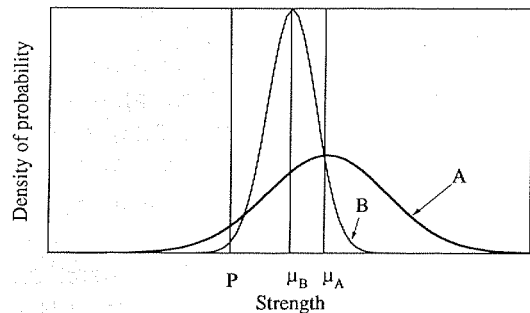


Fig. 1 Influence of parameter on reliability of bonded specimen by the case of normal distribution.

の方が系Aに比較して信頼性が高いという結果を得る。このように、接着系の信頼性を検討するためには、系の破壊強度を統計的に把握しておく必要がある。接着系の

* 日本電信電話㈱

東京都港区芝浦4-16-36 住友芝浦ビル6F

** 東京理科大学 工学部 経営工学科

東京都新宿区神楽坂1-3

*** 三菱電機㈱ 材料研究所

尼崎市塚口本町8-1-1

(原稿受付日：平成5年5月7日)

破壊強度を統計的に扱った研究はあまり報告されていないが Kurzmann, Klemme は、黄銅/シアノアクリレート系接着剤を接着系として選び、破壊強度の統計的評価を試みている³⁾。その結果 Kurzmann, Klemme は、黄銅/シアノアクリレート系の破壊強度が、すでに Kase⁴⁾によって報告されている最小極値分布に従うことを確率紙を用いて確認した。ただし、この検証はただ1つの系について行われたものであり、他の組み合わせの接着系についても同様の結果が得られるかどうかの確認はなされていない。

本研究では、接着系としていくつかの異なる系を選び、それぞれの系における破壊強度の分布適合性を検討することを目的とする。

2. 実験方法および検定方法

2.1 実験方法

本研究では、接着系として4つの異なる系を用意した。被着材は、全ての接着系に対して軟鋼板 (SPCC) を用い、Fig. 2に示すような引張りせん断試験のための試験片を作成する。接着剤としては、Table 1に示す4種類の接着剤が使用された。ハードロック C370, C372 (電気化

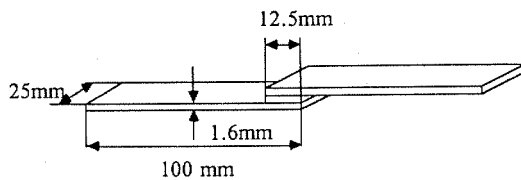


Fig. 2 Shape of bonded specimen for tensile shear strength test.

学工業)は共に変性アクリル系接着剤であり、ハードロック UX2070 (電気化学工業)はウレタン系接着剤、セメダイン1500 (セメダイン) はエポキシ系接着剤である。以後、ハードロック C370/鋼系をA系、ハードロック C372/鋼系をB系、ハードロック UX2070/鋼系をC系、セメダイン1500/鋼系をD系と呼ぶことにする。被着面には、接着に先だってアセトンによる脱脂処理を施した。A系、B系では両被着材の接着部に接着剤のa剤、b剤を別々に等質量均一に塗布した後貼り合わせを

行い、C系、D系では、あらかじめ所定の配合比で計量・混合した接着剤を接着部に塗布した後、貼り合わせを行った。接着後、A、BおよびCの各系では、室温で1週間接着剤を硬化させ、D系では、接着剤を80℃のもとで20分間硬化させた。作成された試験片を引っ張り試験機 Tensiron/UTM-1/500 (東洋ポールドウィン) を用いた引張りせん断試験に供した。また、引張りせん断試験時のクロスヘッドスピードは、2 mm/min とした。

2.2 当てはめをおこなう分布型

各接着系における破壊強度の分布適合性を検討するために、以下に示す5つの分布型への接着強度の当てはめを試みた。

1. 2母数ワイブル分布

$$f(x) = \left(\frac{m}{\eta}\right) \left(\frac{x}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m\right] \quad (1)$$

2. 最小極値分布

$$f(x) = \alpha \exp[y - \exp(y)] \quad y = \alpha(x - u) \quad (2)$$

3. 最大極値分布

$$f(x) = \alpha \exp[-y - \exp(-y)] \quad y = \alpha(x - u) \quad (3)$$

4. 正規分布

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

5. ベータ分布

$$f(x) = \frac{1}{B(q,r)} \frac{(x-l)^{q-1}(u-x)^{r-1}}{(u-l)^{q+r-1}} \quad (u \leq x \leq l) \quad (5)$$

ただし、ここでベータ分布は、 u, l, q, r の4つのパラメータを含んでいるが、本研究では全ての分布型で公平な検討をするために、分布の最小値と最大値を意味するパラメータ u, l をそれぞれ破壊強度の取り得る上限値および下限値として取り扱う。ここでは、破壊強度の取り得る下限値 u を0、上限値 l をデータの平均値にデータの標準偏差を5倍したものを加えた値として与えた。また、ベータ分布の平均、分散は以下のように示される。

$$\mu = l + \frac{q}{q+r}(u-l) \quad (6)$$

$$\sigma^2 = \frac{qr}{(q+r)^2(q+r+1)}(u-l)^2 \quad (7)$$

式(6)(7)よりパラメータ q, r が簡単に求められるので、モーメント法を用いることによって容易にパラメータを

Table 1 Design of adhesive bonded joint.

specimen	adhesive	base metal	sample size
A	SGA	steel (SPCC)	180
B	SGA	steel (SPCC)	270
C	urethane adhesive	steel (SPCC)	518
D	epoxy adhesive	steel (SPCC)	100

推定することができる。

2.3 検定方法

最も簡単な適合性の評価方法として、データの確率紙上へのプロットが知られている。確率紙は、データがその分布に従う場合、プロットが直線に乗るように作られており、種々の確率紙が分布に応じて用意されている。したがって、各種確率紙へのプロットを行い、直線性の良さから適合性を検討することができる。ただし、この方法は客観性に乏しいため、他に客観性のある適合度検定法が各種検討されている。本研究では、データの各分布型への適合性を検討するため以下に述べる3つの適合度検定を行った。

2.3.1 残差平方和を用いた評価法

当てはめる分布に対してデータから得られたパラメータを使って理論的に得られた累積分布関数 F と各データ値に対する F の残差平方和を求め、この残差平方和をデータ数で割り、さらに平方根を取ったものを RMRSS (Route Mean Residual Sum of Squares) と呼ぶことにする。RMRSS を式で表すと次式のようになる。

$$\text{RMRSS} = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^n \left[F(x_r) - \frac{r}{n+1} \right]^2}{n}} \quad (8)$$

ここで、 n は総データ数、 r はデータを昇順に並べたときの順番、 $F(x)$ は当てはめる分布の累積分布関数である。

2.3.2 χ^2 適合度検定

χ^2 適合度検定は、実際に観測された度数 (実測度数) が理論的に計算された度数 (期待度数) に適合しているかどうかを検定したい場合に用いられる方法である。ここで、実測度を a 、期待度を b とするとき χ^2 値は次式によって与えられる。

$$\chi_0^2 = \sum \frac{(a-b)^2}{b} \quad (9)$$

このとき自由度 ϕ は

$$\phi = k - m \quad (10)$$

となる。 k は χ^2 を求めたときの実測度数と期待度数との対の数であり、 m は期待度数を計算するとき用いた母数のうち、実測地から推定したもの数である。次に自

由度 ϕ 、危険率 α に対する χ^2 値を求め

$$\chi_0^2 \geq \chi^2(\phi, \alpha) \quad (11)$$

ならば適合していない (危険率 $\alpha\%$) と判定し、逆ならば一応適合していると判定する。

2.3.3 AIC 統計量を利用した評価方法

AIC (Akaike's Information Criterion) とは、実際に観測されるデータを用いて統計的モデルの悪さを評価するために導入された統計量であり、複数の分布型が仮定されるとき AIC の値の大小によって適合する分布を選択することができる⁵⁾。AIC は、以下のように定義され、AIC が小さい方がより適合した分布型と見なされる。

$$\text{AIC} = -2\ln L + 2n \quad (12)$$

ただし、ここで L は最大尤度、 k はパラメータ数である。

3. 結果および考察

Table 2 にせん断引張り試験の結果得られた破壊応力の最大値、最小値、平均、標準偏差、変動係数および歪度を示す。ただし歪度は、データの標準偏差を σ 、平均値まわりの3次モーメントを C_3 としたとき

$$\text{coefficient of skewness} = \frac{C_3}{\sigma^3} \quad (13)$$

と定義される値である。

B系のみを取り上げ、各確率紙上へのプロットを試みた結果を Fig. 3 に示す。本研究では、各確率紙上にプロットした結果最も直線性の良いものをそのデータに適合した分布型とみなしているが、視覚的な判断は少なからず観察者の主観に影響される。そこで、客観的な判断を容易にするために各分布型への適合度を定量的に検討し、その結果を Table 3 に、適合度検定の結果を Table 4 に示す。

A系では Table 2 に示すように、歪度が 0.4478 であり、最小極値分布の特徴である負の歪度を持たない。すなわち、A系のデータは Kurzman, Klemme によって黄銅/シアノアクリレート系接着剤の場合に適合するとされた最小極値分布には当てはまらなると考えられる。 χ^2 適合度検定の結果でも、データを最小極値分布に当てはめた場合には、有意差が認められている。さらに、AIC 統計量を用いた評価においても、最小極値分布は当てはめを試みた5つの分布型のうち最も適合度が低いという

Table 2 Mean of strength and other statistics of adhesive bonded joints.

specimen	A	B	C	D
maximum strength (kgf/cm ²)	257	270	271	149.4
minimum strength (kgf/cm ²)	127	173	132	61.4
mean of strength (kgf/cm ²)	182.00	219.47	226.16	112.13
standard deviation	30.37	18.95	20.64	17.85
coefficient of variation	0.1669	0.0863	0.0912	0.1592
coefficient of skewness	0.4478	-0.0321	-0.8915	-0.3136

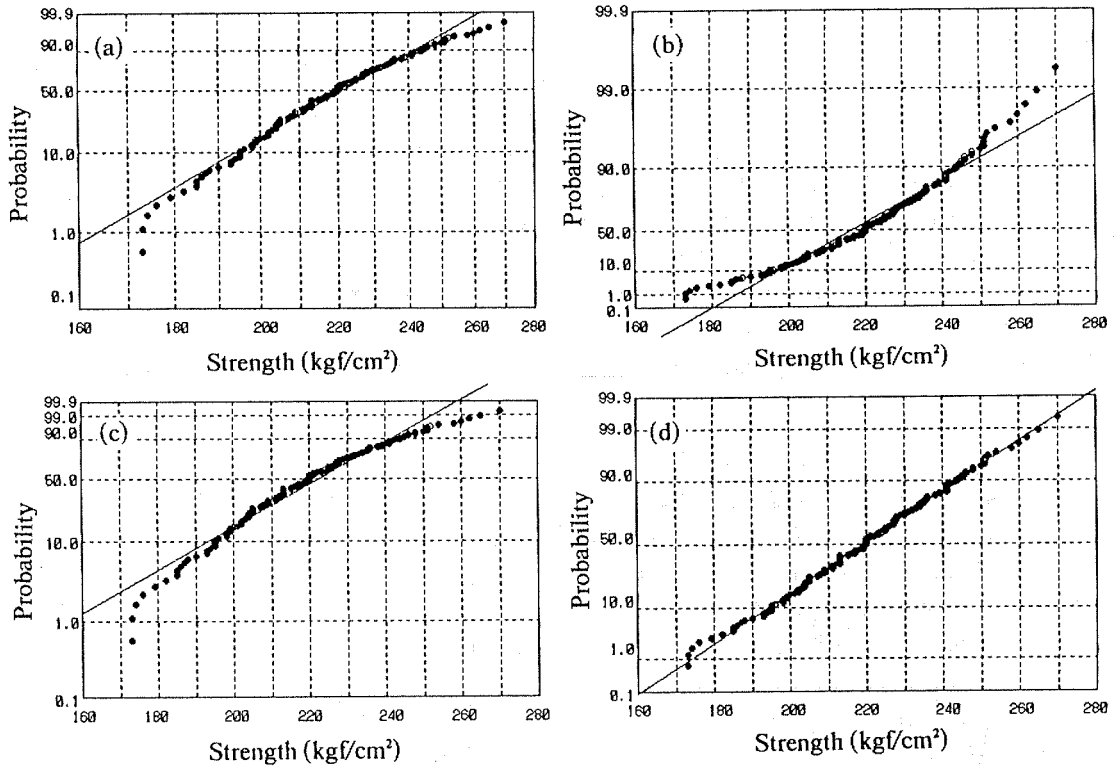


Fig. 3 Data plots on each probability paper. a) Weibull distribution b) normal distribution c) largest value extreme distribution d) smallest value extreme distribution

Table 3 RMRSS, χ^2 value and AIC value of strength.

specimen	A			B		
	RMRSS	χ^2	AIC	RMRSS	χ^2	AIC
Weibull	0.0536	53.71	-235.86	0.0328	36.63	-427.69
largest value extreme	0.0251	11.96	-260.95	0.0446	68.85	-405.98
smallest value extreme	0.0717	111.57	-203.75	0.0480	49.98	-412.17
normal	0.0330	18.14	-254.95	0.0121	24.52	-442.59
beta	0.0350	19.92	-252.98	0.0152	25.12	-441.52
specimen	C			D		
	RMRSS	χ^2	AIC	RMRSS	χ^2	AIC
Weibull	0.0218	22.75	-478.20	0.0290	10.74	-140.84
largest value extreme	0.0578	47.99	-401.38	0.0534	12.09	-97.60
smallest value extreme	0.0306	29.54	-471.33	0.0430	15.28	-133.44
normal	0.0209	20.04	-473.95	0.0214	7.43	-138.17
beta	0.0141	18.24	-479.01	0.0221	8.00	-139.23

Table 4 Results of RMRSS, χ^2 test of fit and AIC.

specimen	A			B		
	RMRSS	χ^2	AIC	RMRSS	χ^2	AIC
Weibull	4	x	4	3	x	3
largest value extreme	1	o	1	4	x	5
smallest value extreme	5	x	5	5	x	4
normal	2	o	2	1	o	1
beta	3	o	3	2	o	2
specimen	C			D		
	RMRSS	χ^2	AIC	RMRSS	χ^2	AIC
Weibull	3	o	2	3	o	1
largest value extreme	5	x	5	5	o	5
smallest value extreme	4	o	4	4	o	4
normal	2	o	3	1	o	3
beta	1	o	1	2	o	2

結果を得た。有意差検定の結果、最小極値分布、ワイブル分布では危険率1%で有意差が確認され、他の3つの分布では有意差は認められなかった。RMRSS、およびAIC統計量を用いた検定の結果、A系のデータが最も適合している分布型は最大極値分布であり、次いで正規分布、ベータ分布となった。

A系と同様な変性アクリル系接着剤を用いたB系から得られたデータでは、負の歪度が確認されたが、 χ^2 適合度検定の結果、最小極値分布への当てはめに対しては有意差が認められた。したがって、本研究で取り扱われた変性アクリル系接着剤による接着系では、破壊強度分布は最小極値分布には従わないと考えられる。ただし、A系で最も適合度の高かった最大極値分布は、B系では適合度が低く、適合度検定の結果有意差すら確認された。それに対し、正規分布、ベータ分布はB系に対しても高い適合度を持ち、特に正規分布はB系に対して最も良い適合性を示した。

ウレタン系接着剤を用いたC系の場合、ワイブル分布と最小極値分布以外の分布型では、適合度検定の結果有意差が確認され、最も適合度の高かった分布型はワイブル分布であった。

それに対して、エポキシ系接着剤を用いたD系では、適合度検定を行った結果、全ての分布型で有意差が確認されなかった。ただし、RMRSSおよびAIC統計量を用いた比較の結果によれば、最も適合度の高い分布型は、ワイブル分布であり、続いて正規分布、ベータ分布となった。

このように、破壊強度の従う分布型は、接着系によって大きく異なる。この破壊強度分布の違いをいくつか模式的に表すとFig. 4のように示される。Fig. 4の3つの曲線は、同一の平均破壊強度および標準偏差を有し、破壊強度がそれぞれ正規分布、最小極値分布および最大極値分布に従う接着系の付加応力に対する破壊確率密度の変化を示したものである。この場合、必要強度を図に示

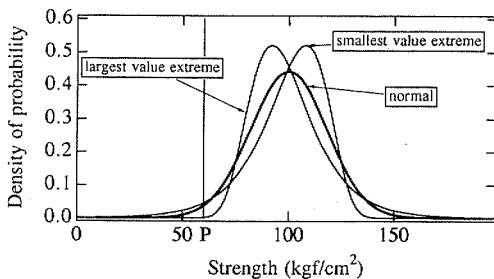


Fig. 4 Density of probability for normal and extreme distribution which have same mean and same standard deviation.

すようにPとすると、この点における破壊確率は、正規分布で 1.29×10^{-2} 、最小極値分布で 3.19×10^{-2} 、最大極値分布で 5.70×10^{-5} となる。すなわち、平均破壊強度・標準偏差などの統計量が明かであっても分布型が知られていない場合には、厳密な信頼性評価は困難となる。例えば、本研究におけるA系のデータは、最大極値分布に最も良く従うと判断され、それに対してB系のデータは、正規分布あるいはベータ分布に従うと判断された。使用を比較検討している接着系の破壊強度が、このように異なった分布型を有しているということは、実際に起こり得ることであり、接着系の信頼性を考慮する場合には、平均破壊強度・標準偏差などの統計量に加え破壊強度の従う分布型を明かにしておくことが重要となる。したがって、Kurzmann, Klemmeによって報告された分布型を黄銅/シアノアクリレート系接着剤の組み合わせ以外の接着系一般に拡大解釈することは望ましくない。また、このような接着系による当てはまる分布型の違いは、破壊強度の分布型が、破壊に到るまでの破壊過程に大きく依存していることを意味していると考えられる。

4. 結言

変性アクリル系接着剤・ウレタン系接着剤・エポキシ系接着剤を用いて銅板を接着した接着系のせん断破壊強度が従う分布型を検討した結果以下のような結果を得た。

- ・変性アクリル系接着剤 (ハードロック C370) / 鋼
……………最大極値分布
- ・変性アクリル系接着剤 (ハードロック C372) / 鋼
……………正規分布
- ・ウレタン系接着剤 (ハードロック UX2070) / 鋼
……………ワイブル分布
- ・エポキシ系接着剤 (セメダイン1500) / 鋼
……………ワイブル分布

したがって、接着系の破壊強度分布は、各接着系で個別に検討されるべきものである。このため、接着系を含む構造体の信頼性設計を行う場合、接着系の破壊強度分布を検討した上で適切な接着系を使用することが、構造体の信頼性を高めるという見地からも望まれるものである。

参考文献

- 1) 浅井 渡, 日本接着協会誌, 25 (10), 474-477, (1989).
- 2) 谷岡 忠幸, 日本接着学会誌, 28(1), 21-28, (1992).
- 3) Peter Kurzmann, D.A. Klemme, J. Adhesion Vol.7, 203-213 (1975)

- 4) S. Kase, J. Polymer Sci. 11, 425-431 (1953)
5) 赤池 弘次, 数理科学, No153, 5-11 (1976)

**A Study of Strength Distribution for
Adhesive-Bonded Joints**

Yoshihiro HASHIMOTO*, Noburu EGUCHI**, Kousuke HARAGA***,
and Yasuo NONAKA**

*Nippon Telegraph and Telephone Corporation

Sumitomo-Shibaura BLDG. 16-36 Shibaura 4-Chome Minato-ku, Tokyo 108 Japan

**Science University of Tokyo 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162 Japan

***Mitsubishi Electric Corporation

1-1, Tsukaguchi-Honmachi 8-Chome Amagasaki, Hyogo 661 Japan

(Accepted for publication : June 4, 1993)

Abstract

In this paper, the author will make a statistical analyses of the strength of adhesive-bonded specimens, bonded with certain kinds of adhesives. Five different distributions (normal distribution, largest value extreme distribution, smallest value extreme distribution, Weibull distribution, and beta distribution) are applied to consider this problem. The suitability of these five types of distribution is estimated by RMRSS (Roule mean Residual Sum of Squares), AIC - Akaike's Information Criterion Statistic - and χ^2 value). The strength distribution of adhesive-bonded specimens could not be expressed with fixed distribution; however, it depends on the adhesive and the base metal. These results indicate the importance of knowing the strength distribution for the appropriate reliability evaluation.

(Received : May 7, 1993)