

# 接着および接着・リベット併用継手の強度分布特性†

今 中 誠\* 原 賀 康 介\*\* 西 川 哲 也\*\*

## Strength Distributions of Adhesive Bonded and Adhesive/Rivet Combined Joints

by

Makoto IMANAKA\*, Kosuke HARAGA\*\* and Tetsuya NISHIKAWA\*\*

The use of adhesive and adhesive/rievet or spot combined bonding methods to join steel plates has been increasing recently because of the high joint efficiency thus obtained.

In this study, the tensile shear strengths of adhesive and adhesive/rievet combined joints were statistically evaluated. The probability of failure was calculated for the two kinds of joints, rivet and adhesive/rievet combined joints. Each data set was then plotted using normal, Weibull and doubly exponential functions. In addition, the effects of the combination of adhesive with rivet on mean tensile shear strength and coefficient of variation were investigated. The main results obtained are summarized as follows;

(1) The strength distribution of adhesive joint was well approximated by Weibull or doubly exponential distribution function. However, in the case that the tensile shear strength is considerably improved by combination with rivet, the strength values of the combined joints do not form a straight line on any of the normal, Weibull and doubly exponential distribution graph paper.

(2) With increasing ratio of strength of rivet joint to that of adhesive joint, the mean strength of the combined joints increased and the coefficient of variation decreased.

**Key words** : Adhesive joint, Adhesive/rievet combined joint, Lap joint, Normal distribution, Weibull distribution, Doubly exponential distribution

### 1 緒 言

鋼板の接合に際して、接着ならびに種々の接着併用継手はスポット溶接やリベット締結と比較して接合による強度低下の少ないことや接合部が気密性を有すること等、種々の優位性を持つことから、注目を集め最近、これら継手の強度特性や応力分布に関する研究報告が増加している<sup>1)~4)</sup>。特に、自動車や電気機器の組立に際して、現状では接着単独の継手より、信頼性や施工上の観点から接着とリベットやスポット溶接との併用継手により多く使われている。また、併用条件により併用継手の強度が接着単独の継手強度に比べて増加することも報告されているが<sup>5),6)</sup>、これら併用継手の強度特性や応力分布に関する研究は、接着継手に関する報告数と比較してまだ少数である。さらに、これら継手の信頼性を明確化する上で必要な強度分布に関する統計的な研究は、接着継手においてごく少数の報告がみられるにすぎず<sup>7)</sup>、併用継手については、まだ報告されていない。

そこで、本研究では接着・リベット併用継手の強度分布特性を調べるため、強度の異なるそれぞれ2種類

の接着剤ならびにリベットを用いて接着ならびに接着・リベット併用継手を作製しその静的強度試験を行い、これら継手の強度分布について正規分布、ワイブル分布ならびに二重指数分布への適応度を調べた。さらに、平均強度ならびに変動係数に及ぼすリベット併用の影響についても検討を行った。

### 2 供試材料および実験方法

静的強度試験に使用した重ね合せ接着継手試験片ならびに接着・リベット併用継手試験片の形状ならびに寸法を Fig. 1 に示す。接着剤は剛性率が高くややぜい性なエポキシ系接着剤 DP190 グレー（住友スリーエム(株)製）ならびに剛性率が低く延性に富むアクリル系接着剤ハードロック C355（電気化学工業(株)製）を使用した。以下、これら接着剤をエポキシならびにアクリル系接着剤と、またこれら接着剤により接合された接着継手をエポキシおよびアクリル系接着継手と略称する。接着剤のヤング率ならびに接着剤のじん性と相関関係があるはく離強度は Table I に示すとおりである。被着体は板厚 2 mm のステンレス鋼板 (SUS 304)

† 原稿受理 平成 4 年 2 月 18 日 Received Feb. 18, 1992

\* 正 会 員 大阪教育大学技術学科 〒543 大阪市天王寺区南河堀町, Dept. of Tech., Osaka Kyoiku Univ., Tennoji-ku, Osaka, 543

\*\* 三菱電機(株)材料研究所 〒661 尼崎市塚口本町, Mat. & Elect. Devices Lab., Mitsubishih Elect. Corp., Tukaguchi-Honmachi, Amagasaki, 661

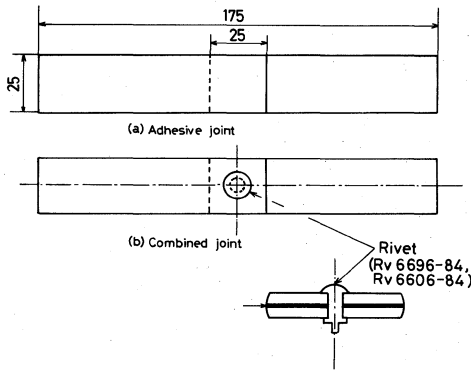


Fig. 1. Shape and sizes of the adhesive and adhesive/rivet combined joints.

Table I. Mechanical properties of adhesives (25°C).

Adhesive	Young's modulus (MPa)	Peel strength (N/mm)
DP190 (Epoxy)	1100	197
C355 (Acryl)	765	284

\* Peel test: ISO 4578 (Floating roller method).

を使用した。さらに、リベットとしては、強度の異なるニッケル銅合金リベット RV6696-84 ならびにアルミニウム合金リベット RV6606-84 (ポップリベットファスナー(株)製)を使用した。以下、これらリベットを 6696 ならびに 6606 リベットと、これらリベットにより締結されたリベット継手を 6696 および 6606 リベット継手と略称する。

併用継手については、次の方法で作製した。まず、アセトンで被着体表面を脱脂し、脱脂した被着体表面にエポキシ系ならびにアクリル系接着剤ともに主剤および硬化剤の2液を同量滴下し、十分に混合した後、もう一方の被着体を貼合せ、ただちにリベットを打った。以下、エポキシ系ならびにアクリル系接着剤にリベットを併用した継手をそれぞれエポキシおよびアクリル系併用継手と略称する。なお、接着層の厚さを一定にするため接着剤中に 100 μm の樹脂ビーズを接着剤に少量添加した。リベットの締結にはエアリベット AR-011H (日本理器製)を用いた。リベット締結後は室温に24時間放置した後、70°Cで6時間の後硬化を行い、強度試験に供した。なお、接着ならびにリベット継手の製作方法は併用継手のリベット締結ならびに接着工程を省略した方法で行った。

静的強度試験は島津 DCS-5000 型オートグラフを用いて、クロスヘッド速度 1 mm/min で実施した。なお、強度分布を求めるに際しての試験本数はそれぞれ 50 本とした。

### 3 実験結果および考察

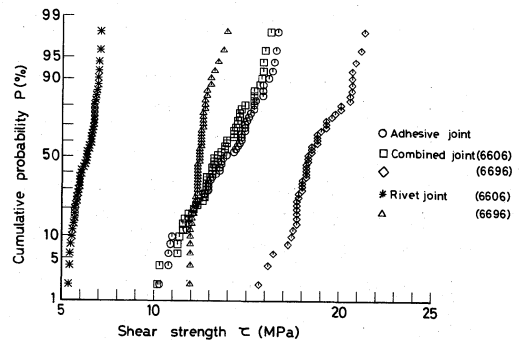
本章では接着、リベットならびに併用継手の強度分

布特性について調べるとともに、基礎統計量(平均、変動係数)に及ぼすリベット併用効果について検討を行った。

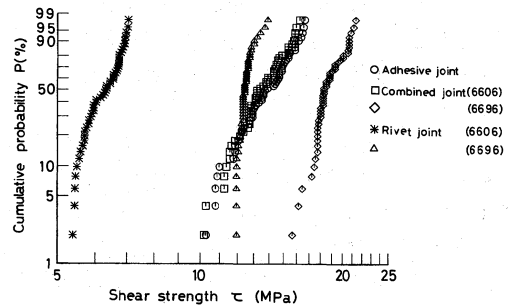
#### 3・1 静的強度分布

一般に延性な材料は正規分布に、また、ぜい性な材料は極値分布に適応するといわれている<sup>8)</sup>。また、Kurzmannらは突合せならびに重ね合せ接着継手について正規分布よりむしろ2重指数分布に適応すると報告している<sup>7)</sup>。そこで、ここでは、接着、リベットならびに併用継手の強度分布について正規分布に対する適応性を調べるとともに、極値分布として多くの材料の強度分布が示されているワイブル分布、さらに2重指数分布に対する適応性について検討を行った。

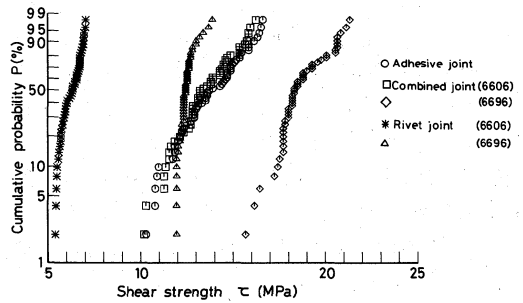
3・1・1 エポキシ系接着および併用継手の強度分布 Fig. 2 (a), (b) はエポキシ系接着継手、6696 と



(a) Normal distribution.



(b) Weibull distribution.



(c) Doubly exponential distribution.

Fig. 2. Strength distributions of adhesive, rivet and combined joints (Epoxy adhesive).

Table II. Statistic properties of tensile shear strength.

Kind of joint		Adhesive	Combined	Adhesive	Combined
Kind of adhesive		Epoxy	Epoxy	Acryl	Acryl
Kind of rivet		—	6606	—	6696
Normal distribution	Mean value $\mu$ (MPa)	13.8	13.5	24.1	25.6
	Standard dev. $\sigma$ (MPa)	1.66	1.30	0.84	1.02
	Coeff. of var. CV (%)	12.0	10.8	3.5	4.0
Weibull distribution	Shape parameter $m$ (-)	9.56	10.18	36.96	34.54
	Scale parameter $a$ (MPa)	14.57	14.21	24.45	25.97
Doubly exponential distribution	Location parameter $u$ (-)	0.149	0.139	0.0669	0.0759
	Scale parameter $b$ (MPa)	14.64	14.25	24.46	25.99

PDF: Normal distribution

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

PDF: Weibull distribution

$$f(x) = \frac{m}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{m-1} \exp\left\{-\left(\frac{x}{a}\right)^m\right\}$$

PDF: Doubly exponential distribution

$$f(x) = \frac{1}{b} \exp\left(\frac{x-u}{b}\right) \exp\left\{-\exp\left(\frac{x-u}{b}\right)\right\}$$

\* PDF (Probability density function).

6606 リベット継手ならびに 6696 と 6606 の 2 種類のリベットを併用したエポキシ系併用継手の強度分布を正規ならびにワイブル確率紙に示したものである。また, Fig. 2(c) は二重指数分布に対する適応性を調べるためワイブル確率紙の横軸を普通目盛りで修正したプロットを示している。いずれの図とも横軸は単位接着面積もしくは重ね合せ部の面積あたりの見かけのせん断強度を, 縦軸は累積破断確率を示している。

まず, エポキシ系接着継手の各分布に対する適応性について検討を行う。正規分布に対しては Fig. 2(a) に示されるように高強度側でやや左上がりの傾向が認められるが, 低強度側では良好な直線関係が得られている。ワイブル分布に対しては Fig. 2(b) より, 全体に良好な直線関係が得られているが, 低強度側でやや直線関係から高強度側に逸脱する傾向が認められる。二重指数分布に対しては, Fig. 2(c) より, ワイブル分布とほぼ同様の傾向が認められるが, 低強度側における直線関係からのずれはワイブル分布よりやや増加していることが認められる。接着継手の強度分布はこれらいずれの分布に対しても比較的良好的な適応性を示すことから, 最尤推定法によりこれら分布の母数を推定し, 推定値を Table II に示すとともに, コロモゴルフスミルノフの適応度検定を行った。すなわち,  $\tau$  を見かけのせん断強度とした場合, Fig. 2 に示すような実測した累積標本分布  $P_n(\tau)$  と推定値を母数とする累積分布関数  $F(\tau)$  に対して,  $\tau$  の範囲における  $F(\tau)$  と  $P_n(\tau)$  の垂直距離の最大値を表す次式に示すような  $D_{max}$  を定義する。

$$D_{max} = \sup_{\tau} |F(\tau) - P_n(\tau)|$$

すなわち,  $D_{max}$  は推定された分布関数に対する標本分布の適応度を表しており,  $D_{max}$  が低いほど適応

度が高いことが示される。

Fig. 3 はそれぞれの継手について, 正規, ワイブルならびに二重指数分布に対する  $D_{max}$  の値を示している。図より, エポキシ系接着継手はワイブル分布に対する適応度が最も高いが, 他の分布との顕著な差異は認められない。なお, Table II ならびに Fig. 3 には比較的良好的な直線関係が認められるアクリル系接着および併用継手ならびに 6606 リベットを併用したエポキシ系併用継手の母数ならびに検定結果も示している。

リベット継手については, 6696 および 6606 リベット継手とも, Fig. 2(a), (b), (c) いずれの分布についても左下がりの曲線になっている。3 母数ワイブル分布に対する適応を考えるならば, 正の位置母数の存在が予想される。

併用継手については, 接着強度の 1/2 以下の強度を示す 6606 リベットを併用した場合, 併用継手の強度分布はいずれの分布に対しても接着継手の分布とほぼ一致している。適応度検定の結果は Fig. 3 に示すよ

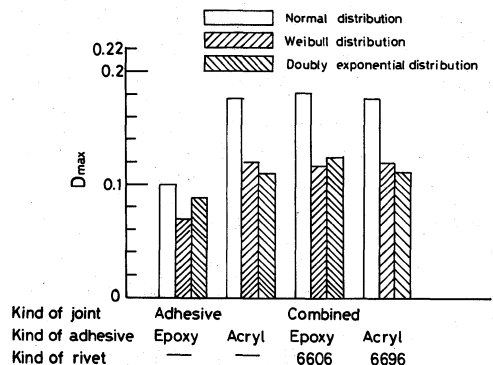


Fig. 3. The fitness of the theoretical distributions.

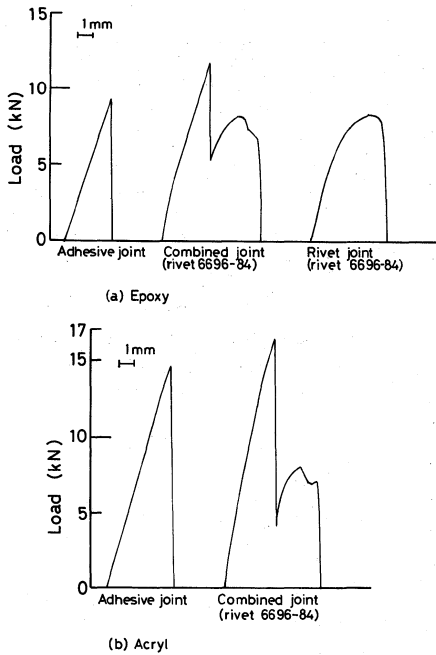


Fig. 4. Examples of load-deflection curves.

うに接着継手と比較していずれの分布に対する適応度も低下し、特に正規分布に対する適応度が最も低くなっている。一方、接着継手強度と同程度の強度をもつ 6696 リベットを併用した場合、継手強度は明らかに接着継手強度を上回る。さらに、強度分布についても Fig. 2 (a), (b), (c) いずれの分布に対しても折線となる傾向が認められる。

Fig. 4 に代表的な接着、リベットならびに併用継手の荷重-変位関係を示している。図より併用継手については、接着部の破断による最大荷重のピークに続きリベットの破断によるピークが認められ、併用継手の強度は接着部の破断に対応している。しかし、併用継手において、接着部の破断強度は接着強度ならびにリベット締結力さらにはリベット強度等の独立した分布をもついくつかの要因が複合されて影響するものと考えられ<sup>5), 6), 11), 12)</sup>、そのため、併用継手の強度分布は、単一の強度分布として示されず確率紙上の折れ曲がりが生じるものと推察される。

3・1・2 アクリル系接着継手および併用継手の強度分布 Fig. 5 (a), (b), (c) において、Fig. 2 と同様にアクリル系接着剤により接着された接着継手ならびに 6696 リベットを併用した併用継手の正規分布、ワイブル分布ならびに 2 重指数分布に対する適応性を調べた。なお、比較のため Fig. 2 に示した 6696 リベットの強度分布もあわせてプロットしている。

接着継手についてはエポキシ系接着継手に比べて分布の勾配が増加し、それぞれの確率紙の直線性がやや

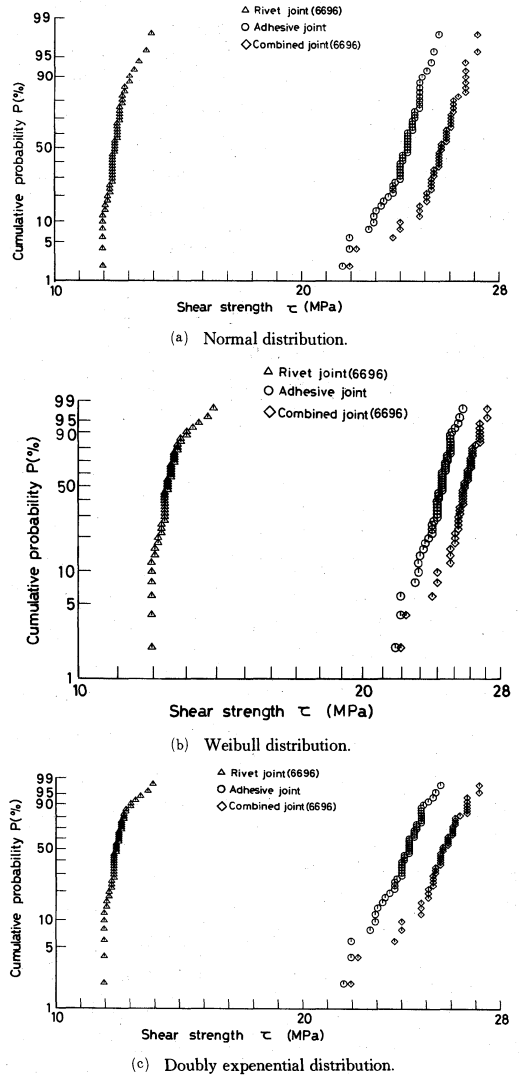


Fig. 5. Strength distributions of adhesive, rivet and combined joints (Acryl adhesive).

低下している。正規分布に対しては Fig. 5 (a) に示されているように、やや左上がりの傾向が認められる。ワイブル分布については Fig. 5 (b) に示されているように正規分布より直線性は良くなっているが、やや低荷重側で左下がりの傾向が認められる。2 重指数分布については Fig. 5 (c) に示されているようにワイブル分布よりさらに直線性がよくなっている。

アクリル系接着継手のコロモゴルフスミルノフの検定による  $D_{max}$  の値は、Fig. 3 に示すように、エポキシ系接着継手に比べていずれの分布に対してもアクリル系接着継手の  $D_{max}$  の値が増加し、2 重指数分布に対する  $D_{max}$  の値が最小値をとることが認められる。

Kurzmann らは突合せならびに重ね合せ接着継手について、正規分布よりむしろ 2 重指数分布に適応する

としている<sup>7)</sup>。本実験結果からも、エポキシならびにアクリル系接着継手ともに正規分布よりむしろ極値分布であるワイブルおよび2重指数分布に対する適応度が高くなっており、傾向的に Kurzmann らの結果と一致するものの、エポキシ系接着継手については正規分布と2重指数分布およびワイブル分布との適応性の差異はわずかである。また、強度分布特性と接着剤のじん性値との関係から考えると、Table I に示されているようにアクリル系接着継手のじん性がエポキシ系接着継手のじん性より高いことから、エポキシ系接着継手の方が2重指数もしくはワイブル分布に対する適応性が高いことが推測され、本実験の傾向と一致しない。

Kurzmann らの報告では、接着剤ならびに突合せおよび重ね合せ接着継手の形状はそれぞれ1種類であり、標本数も25本と限定されている。接着継手の強度分布については接着剤の種類においても本実験結果が示すように強度分布の適応度が変化する。また、野中らも継手形状の変化によって、正規分布と極値分布に対する適応度が変化するを指摘している<sup>13)</sup>。したがって、一般的な接着継手の強度分布の適応性を予想することは困難であり、継手の信頼性を考える上から、種々の接着継手についての強度分布データの蓄積が必要であると考えられる。

併用継手については、高強度の6696リベットを併用した場合のみを示している。この場合、リベット単独の継手強度は接着継手強度の約1/2である。図に示すようにリベットを併用することによりやや継手強度が増加することが認められる。強度分布については、わずかに分布曲線の折れ曲がり傾向が確認される。また、適応度検定の結果はFig. 3に示すように接着継手の  $D_{max}$  の値とほぼ一致している。なお、Fig. 3に示したエポキシおよびアクリル系いずれの接着ならびに併用継手についても、有意水準5%でいずれの分布にも適応するという仮説が採択されることが判明している。

### 3・2 リベット併用の平均強度および変動係数に及ぼす影響

接着、リベットならびに併用継手の平均強度ならびに変動係数をFig. 6にまとめて示す。図より、アクリル系接着継手の平均強度はエポキシ系接着継手、6696および6606リベット継手のそれぞれ約1.8, 1.9, 3.8倍に達しており、平均強度に関してアクリル系接着継手はエポキシならびにリベット継手よりも優れていることが認められる。一方、アクリル系接着継手の変動係数については、6696リベットの変動係数とほぼ一致するが、エポキシ系接着継手ならびに6606リベット継手に対しては、それぞれ約0.3, 0.4倍となっており、エポキシ系接着継手ならびに6606リ

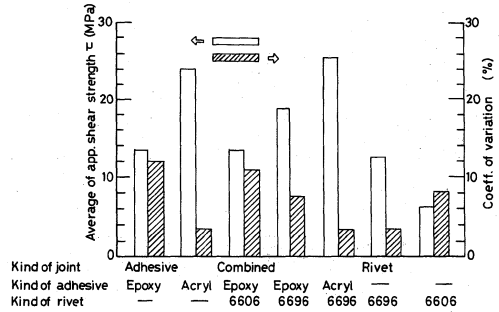


Fig. 6. Mean strength and coefficient of variation of adhesive, rivet and combined joints.

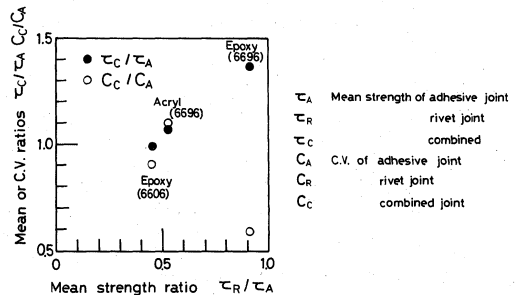


Fig. 7. Effects of normalized strength of rivet joint on normalized mean and coefficient of variation of combined joints.

ベット継手と比較して変動係数は大幅に低下していることが認められる。

また、エポキシ系接着継手の平均強度は6696リベット継手のそれをやや上回るが、変動係数は約3.5倍となっており、強度面での信頼性を考えると6696リベット継手の方が優れていると考えられる。

つぎに、接着継手に対してリベット併用が、平均強度ならびに変動係数に及ぼす影響をFig. 7に示す。なお、縦軸は併用継手の平均強度  $\tau_c$  ならびに変動係数  $C_c$  をそれぞれの併用継手に対応する接着継手の平均強度  $\tau_A$  ならびに変動係数  $C_A$  で正規化されており、横軸は対応する接着継手の平均強度  $\tau_A$  に対するリベット継手の平均強度  $\tau_R$  の強度比を示している。図より、 $\tau_R / \tau_A$  の比率が増加するにつれてリベット併用による強度上昇比が増加する傾向が認められる。このような傾向は測定温度、リベット数ならびにラップ長さの異なるステンレスリベットを併用したリベット・接着併用継手においても確認されている<sup>2)</sup>。一方、変動係数についても変動係数の絶対値の低いアクリル系接着継手において6696リベット併用によりやや変動係数の増加が認められるが、エポキシ系接着継手においては、リベット継手強度と接着継手強度の比率の増加に伴い変動係数の低下の割合が大きく増加することが認められる。

## 4 結 言

ステンレス鋼板を被着体とする接着ならびに接着リベット併用継手の強度分布の正規、ワイブルならびに2重指数分布に対する適応性を調べるとともに、基礎統計量に及ぼすリベット併用効果について検討を行った。主な結果は以下のとおりである。

(1) エポキシならびにアクリル系接着継手はコロモゴルフスミルノフの検定結果よりいずれもワイブルおよび2重指数分布によく適応していることが確認された。また、アクリル系接着継手の各分布に対する適応度はエポキシ系接着継手に比べて低下していることが認められた。

(2) リベット継手については、3母数ワイブル分布に対する適応を考えるならば正の位置母数の存在が予想される。

(3) 併用による強度増加が認められる6696リベットを併用したエポキシ系併用継手ならびにアクリル系併用継手についてはいずれの分布に対しても折線となる傾向が認められた。また、その傾向は併用による強度増加の割合が大きいエポキシ系併用継手において顕著である。

(4) リベット併用継手について、対応する接着継手の平均強度に対するリベット継手の強度比が増加することによって、リベット併用による平均強度の増加傾向が確認された。変動係数についても、変動係数の絶対値の低いアクリル系接着継手に6696リベットを併用した場合を除き、リベット継手強度と接着継手強度の比率の増加に伴い変動係数の低下の割合が増加することが確認された。

終わりに本研究の実施に当り、当時大阪教育大学学生であった浜田誠、久和人両氏の協力を得た。記して謝意を表する。

(平成3年6月21日 第29回日本接着学会年次大会にて講演)

## 参 考 文 献

- 1) 例えば, A. J. Kinloch, *J. Mat. Sci.*, **17**, 67 (1982).
- 2) K. R. Wenitz and H. F. Wolfe. *Trans ASME Ser. H*, **100**, 70 (1978).
- 3) G. V. Scarich and G. R. Chanani, *J. Aircraft*, **19**, 773 (1982).
- 4) P. Albrecht and A. H. Sahli, *ASTM STP 927* (1986).
- 5) 原賀康介, 児玉峯一, *日本接着協会誌*, **21**, 4 (1985).
- 6) 原賀康介, 西川哲也, *日本接着協会誌*, **25**, 299 (1989).
- 7) P. Kurzmann and D. A. Klemme, *J. Adhesion*, **7**, 203 (1975).
- 8) 岡村弘之, 板垣 浩, “強度の統計的取扱=構造強度信頼性工学”, p. 36 (1981) 培風館
- 9) 大滝 厚, 鈴木和幸, 長沢伸也, “パソコン BASIC 統計解析”, p. 213 (1984) 東海大学出版会
- 10) P. G. Hoel, “Introduction to Mathematical Statistics”, (1971); John Wiley & Sons Inc., 浅井 晃, 村上正康邦訳, 入門数理統計学, 318 (1990) 培風館
- 11) 今中 誠, 岸本和一郎, 沖田耕三, 原賀康介, 西川哲也, *材料*, **38**, 1373 (1989).
- 12) 今中 誠, 原賀康介, 西川哲也, *日本機械学会論文集*, **A-58**, 546 (1992).
- 13) 野中保雄, 宮入裕夫, 池上皓三, 中島常雄, 永田宏二, 柳沢誠一, 柳原栄一編 “接着応用技術”, p. 507 (1991) 日経技術図書