

## &lt;技術論文&gt;

(受理：平成 25 年 12 月 4 日)

接着強度設計における設計基準強度と  
設計許容強度の算定法

原賀 康介\*

## 要 旨

接着接合が汎用的な接合方法として位置付けられるためには、設計基準の確立が必要である。そこで、接着強度の低下因子として、(1) 強度の温度依存性、(2) 強度のばらつき、(3) 内部破壊、(4) 劣化を考慮し、設計基準強度と設計許容強度を求める手法を提案する。本手法により試算した結果、設計基準強度は、使用温度範囲における初期の最低平均強度の  $1/13 \sim 1/27$  であり、安全率を 1.5 倍とすると、設計許容強度は  $1/20 \sim 1/40$  であることが分かった。

## 1. 緒 言

接着剤による接合は、その特徴・機能から各種の産業分野で高度な適用がなされている。しかし、ボルト・ナットや溶接のように「工業的に汎用的な接合方法」とはなり得ていない。これは、接着剤による接合の設計基準や設計手順が不明確であるため、適用までに多大な検証試験が必要であり、十分な開発期間と開発リソースがない場合にはその適用が困難なためである。

これまでに、高信頼性接着の基本条件として、(1) 接着部の破壊状態は、凝集破壊率が 40% 以上であること、(2) 初期の接着強度の変動係数は、0.10 以下であること、の 2 点を満たすことの重要さが示されている<sup>1)</sup>。しかし、未だ強度設計には不十分で、第 3 の条件として、「設計基準に則った強度設計の実施」を追加する必要がある。

そこで本報告では、接着接合を汎用的な接合方法として位置付ける際に必要になる、設計基準強度の算出法について考察を行う。さらに本手法に安全率を適用し求めた設計許容強度についても言及する。

## 2. 設計基準強度、設計許容強度の考え方

接着強度は、一般に破断試験で求められることが多いが、破断強度を無条件に利用可能な接着強度と考えるのは危険

である。そこで、通常求められている破断強度や平均値、並びに劣化前の初期値などではなく、次に示すような接着強度の低下に及ぼす各種因子の影響を考慮し、利用可能な接着強度を求め、それを設計基準強度とする手法を本報告では提案する。

接着強度の低下に影響する因子としては、(1) 接着強度の温度依存性、(2) 接着強度のばらつき、(3) 内部破壊の発生、および (4) 劣化による接着強度の低下と強度ばらつきの増大、が考えられる。

これらを考慮することにより、接着強度の実力値といえる設計基準強度が得られ、さらに安全率を適用することにより、設計許容強度が得られる。

本報告では、文献<sup>1)</sup>に示した高信頼性接着の基本条件を接着系が満たすことを前提とする。従って、破壊状態は全て凝集破壊と想定する。

## 3. 接着強度の低下に影響する因子

## 3.1 接着強度の温度依存性

ここでは、室温での接着強度ではなく、製品の使用温度範囲において接着強度が最も低下する温度下での接着強度を考える。Fig. 1 に示すように、有機物系の接着剤の場合は、温度によって接着強度が変化する。一般に、高温や極めて低い温度領域では、室温付近の強度に比べ接着強度が低下する。接着部の使用温度範囲において、接着強度が最も低下する温度下における接着強度を  $\mu_T$  とし、室温での接着強度  $\mu_0$  に対する  $\mu_T$  の比率 ( $\mu_T/\mu_0$ ) を温度依存係数  $\eta_T$  と定義する。 $\mu_0$ 、 $\mu_T$  は容易に実測できるので、温度依

\* (株) 原賀接着技術コンサルタント  
兵庫県芦屋市緑町 1-9-301 〒659-0042  
(原稿受付日：平成 25 年 7 月 3 日)

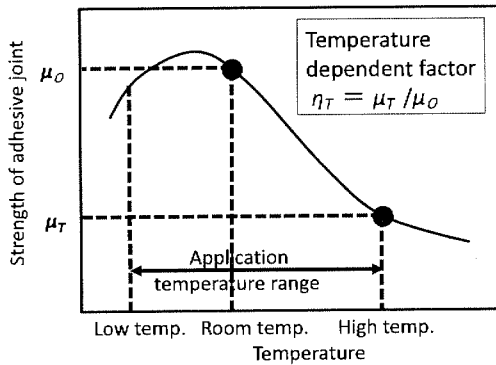


Fig. 1 Schematic diagram of temperature vs strength of adhesive joint and temperature dependent factor,  $\eta_T$ .

存係数  $\eta_T$  も容易に求めることが可能である。

### 3.2 接着強度のばらつき

ここでは、接着強度のばらつきを考慮し、製品の設計段階であらかじめ設定される許容不良率  $F(x)$ <sup>2,3)</sup> を満たし得る最低の接着強度  $p$  を考える。許容不良率  $F(x)$  は製品によって異なるが、1/10~1/100 程度に設定される場合が多い<sup>2)</sup>。接着強度の分布は、被着材料の変形や伸びが小さく、凝集破壊する場合には正規分布に従うことが知られている<sup>2~4)</sup> ので、ここでは接着強度の分布を正規分布として扱う。

Fig. 2 に、平均接着強度  $\mu$  が同じで変動係数  $CV$  (標準偏差  $\sigma$ /平均値  $\mu$ ) が異なる二つの正規分布を示す。各分布の低強度側の塗りつぶした部分の面積 (確率) は、設計段階であらかじめ設定されている接着部品の許容不良率  $F(x)$  に相当する。許容不良率  $F(x)$  が同じであっても、許容不良率を満たす下限の接着強度  $p$  は、変動係数  $CV$  の大小により異なる。平均強度  $\mu$  に対する許容不良率を満

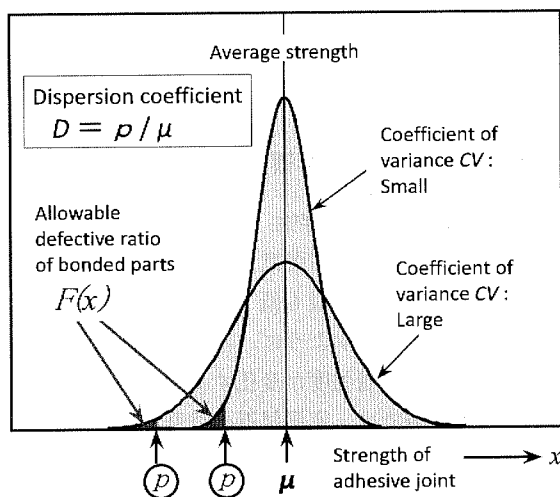


Fig. 2 Allowable defective ratio of bonded parts  $F(x)$ , lowest strength  $p$  and dispersion coefficient  $D$  in normal distribution.

足する下限の接着強度  $p$  の比率 ( $p/\mu$ ) をばらつき係数  $D$  と定義する。ばらつき係数  $D$  の求め方は 4.1 項にて後述する。

### 3.3 内部破壊の発生

#### 3.3.1 内部破壊係数

本報告では、Fig. 3 に示すように、接着強度を破断強度ではなく、破断以前に低荷重域で生じる内部破壊の発生開始強度と見なす。破断強度に対する内部破壊発生開始強度の比を内部破壊係数  $h$  とし、次の三つの場合について考察を行う。

- (1) 静的荷重負荷の場合 (内部破壊係数を  $h_1$  とする)
- (2) 繰返し疲労などの高サイクル疲労が加わる場合 (内部破壊係数を  $h_2$  とする)
- (3) ヒートサイクルやヒートショックなどの低サイクル疲労が加わる場合 (内部破壊係数を  $h_3$  とする)

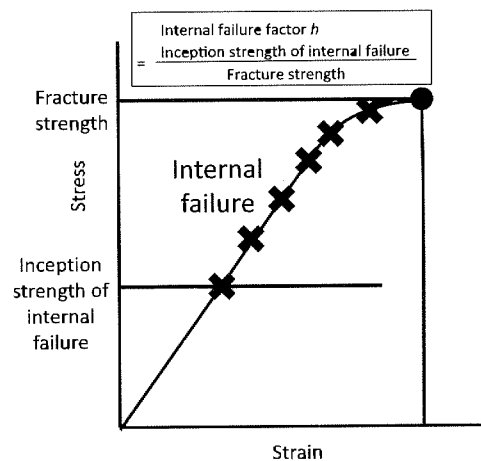


Fig. 3 Schematic diagram of fracture strength and inception strength of internal failure in stress-strain curve and internal failure factor  $h$ .

#### 3.3.2 静荷重負荷の場合の内部破壊係数 $h_1$

静的荷重負荷の場合の内部破壊の測定は AE (Acoustic Emission) を用いて行った。試験片としては、1.6mm 厚さのステンレス鋼板 SUS304 同士をかなり柔らかめの二液型変性アクリル系接着剤ハードロック HLS-29 で接着した引張りせん断試験片を用いた。Table 1 に測定結果を示す<sup>1,2,4)</sup>。凝集破壊した試験片はステンレスに低圧水銀灯の短波長紫外線照射を行ったものである。短波長紫外線を照射していない界面破壊の結果も参考に示す。この結果より、凝集破壊の場合は、破断荷重の 51% 以上の荷重負荷で AE が発生し始めている。したがって、静荷重負荷に対する内部破壊係数  $h_1$  は、概ね 0.5 程度と考えられる。しかしながら、本係数の値は、今後のデータ蓄積によって高精度化することが必要と考えられる

Table 1 Evaluation results of internal failure by acoustic emission.

Fracture mode	Sample No.	Internal failure factor $h$
Cohesive failure	1	0.51
	2	0.76
	3	1.00
	Average	0.76
Interfacial failure	1	0.07
	2	0.08
	3	0.31
	Average	0.15

3.3.3 高サイクル疲労の場合の内部破壊係数  $h_2$

高サイクル疲労の場合の内部破壊係数は繰返し疲労試験により求めた。疲労試験の結果を Fig. 4 に示す<sup>2,4)</sup>。試験片は、Table 1 に示したものと同様とした。周波数 20Hz の引張り片振りせん断試験を実施した。表面処理は 3 種類行った。溶剤脱脂のみの場合は界面破壊、短波長紫外線照射の場合は凝集破壊率 70%、有機リン酸塩系プライマー (F-200, 電気化学工業 (株) 製) 塗布の場合は完全な凝集破壊が観察された。繰返し疲労における破壊は、内部の微細な破壊が蓄積するためと考えられる。静的破断荷重と、 $10^7$  回の高サイクル疲労における最大負荷荷重との比を本報告では内部破壊係数  $h_2$  と定義する。凝集破壊率 70% の結果から内部破壊係数を求めると、この場合  $h_2 = 0.25$  となった。

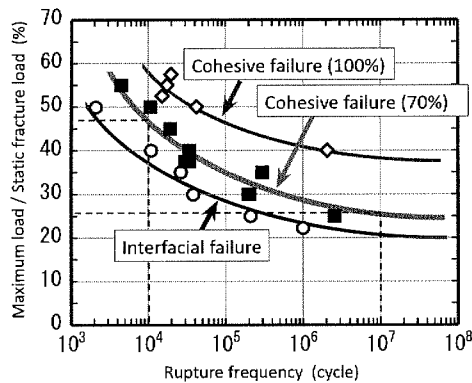


Fig. 4 Result of fatigue test.

3.3.4 低サイクル疲労に於ける内部破壊係数  $h_3$

Fig. 4 に示した凝集破壊率 70% の結果から、静的破断荷重と、 $10^4$  回における最大負荷加重の比を内部破壊係数  $h_3$  としたところ、この場合  $h_3 = 0.45$  となった。

3.4 劣化による接着強度の低下と強度ばらつきの増大

接着強度を劣化前の初期強度ではなく、劣化後の強度で考察する。接着部の劣化により、Fig. 5 に示すように、(1) 接着強度の低下と、(2) 接着強度のばらつきの増大が起こる<sup>1~5)</sup>。ここで、劣化後の平均強度を  $\mu_y$ 、初期の平均強度を  $\mu_0$  とし、 $\mu_y/\mu_0$  を強度保持率  $\eta_d$  と定義する。劣化後のばらつきの増大は接着強度の変動係数  $CV$  が増加するとして扱う<sup>1~5)</sup>。ここでは、劣化後の変動係数  $CV_y$  は、初期の

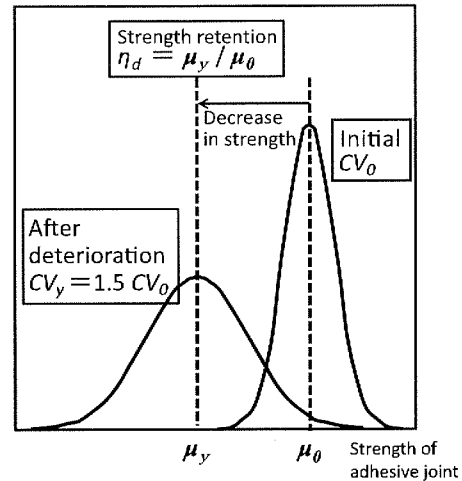


Fig. 5 Decrease in strength and increase of dispersion by deterioration.

変動係数  $CV_0$  の  $k$  倍に増大するとし、過去の実績を踏まえ  $k$  を 1.5 倍に設定した<sup>1~5)</sup>。この根拠は、これまで著者が取得してきた多くの耐久性試験結果に基づいており、先に述べた高信頼性接着の二つの基本条件を満足している場合は、屋外で 30 年間使用しても、 $k$  が 1.5 倍以上に増大したケースが存在しないためである。この値は長期の曝露に対応しているため、接着製品の耐用年数がより短く 30 年以内の場合は、変動係数の増大率を 1.2 や 1.3 などに低減することも可能である。

劣化後の強度保持率  $\eta_d$  は、高信頼性接着においては、低くても 50% 程度を確保する必要がある。劣化による強度低下が大きすぎると、予測不可能な現象による破壊等が懸念される。

4. 設計基準強度と設計許容強度の算出

4.1 ばらつき係数  $D$  の決定

3.2 節に示したように、ばらつき係数  $D = [\text{許容不良率 } F(x) \text{ を満たす下限の接着強度 } p / \text{平均強度 } \mu]$  であり、 $p$  の値は、(1) 式に示す正規分布関数から求めることができる。低強度側の種々の確率 (許容不良率) において、接着強度の変動係数  $CV$  からばらつき係数  $D$  を容易に求めるために、(1) 式を基に計算を実施した。その結果を Fig. 6 に示す<sup>1~5)</sup>。

$$F(x) = \int_{-\infty}^p \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} dx \quad (1)$$

初期の接着強度の変動係数  $CV_0$  は、初期強度の標準偏差  $\sigma_0$  / 平均値  $\mu_0$  として容易に求めることができる。次に、劣化後の変動係数  $CV_y$  を、初期の変動係数  $CV_0 \times k$  で求めることができる。たとえば、3.4 節で示したように、 $k = 1.5$  とすると、 $CV_y = CV_0 \times 1.5$  となる。Fig. 6 中の、 $CV_y$  とあらかじめ設定されている許容不良率  $F(x)$  の交点から、劣

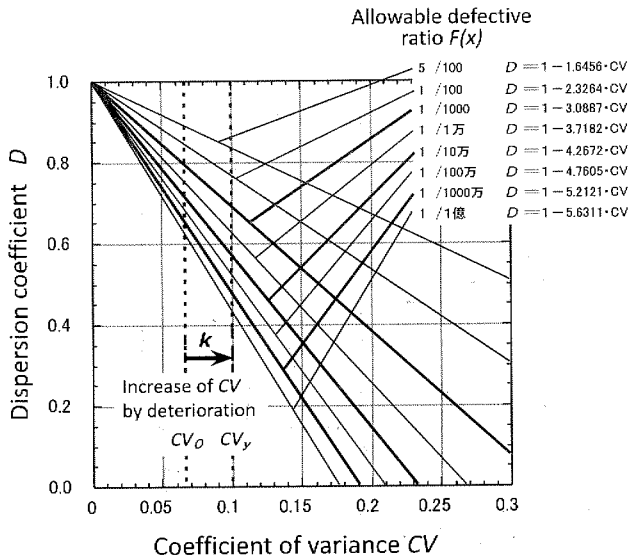


Fig. 6 Related chart of allowable defective ratio  $F(x)$ , coefficient of variance  $CV$  and dispersion coefficient  $D$ .

化後のばらつき係数  $D_y$  を求めることができる。劣化後の変動係数  $CV_y$  と4つの許容不良率  $F(x)$  における劣化後のばらつき係数  $D_y$  の計算例を Table 2 に示す。Table 2 には、劣化後の変動係数を1.5で除した初期の変動係数  $CV_0$  も併記した。最初に述べた高信頼性の基本条件では、初期の変動係数  $CV_0$  が0.10以下である必要がある。即ち、劣化後の変動係数は0.15以下であることが必要である。許容不良率は、一般に1/10万~1/100万に設定されることが多い。Table 2 にこれらの範囲を白地で示す。この結果から、劣化後のばらつき係数  $D_y$  は0.29以上になる事が分かる。

4.2 設計基準強度 (接着強度の実力値) の算出

設計基準強度 (接着強度の実力値) は、(2) 式で表される。

$$\begin{aligned} \text{設計基準強度} &= \text{初期室温平均破断強度 } \mu_0 \times \\ &\quad \text{温度依存係数 } \eta_T \times \text{内部破壊係数 } h \times \\ &\quad \text{劣化後のばらつき係数 } D_y \times \\ &\quad \text{劣化後の強度保持率 } \eta_d \end{aligned} \quad (2)$$

Table 2 Dispersion coefficient after deterioration  $D_y$  obtained from coefficient of variance after deterioration  $CV_y$  and allowable defective ratio  $F(x)$ .

Allowable defective ratio $F(x)$	Coefficient of variance after deterioration $CV_y$											
	(The lower : Coefficient of variance before deterioration $CV_0$ )											
	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20	0.30
	0.05	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.20
1/1万	0.73	0.67	0.63	0.59	0.55	0.52	0.48	0.44	0.41	0.33	0.26	-0.11
1/10万	0.66	0.62	0.57	0.53	0.49	0.45	0.40	0.36	0.32	0.23	0.15	-0.28
1/100万	0.62	0.57	0.52	0.48	0.43	0.38	0.33	0.29	0.24	0.14	0.05	-0.43
1/1000万	0.58	0.53	0.48	0.43	0.37	0.32	0.27	0.22	0.17	0.06	0.04	-0.56

ここで、 $\mu_0$ ,  $\eta_T$  は実測により容易に求めることができる。内部破壊係数  $h$  は、3.3.2~3.3.4 項に示すように、静的荷重負荷の場合は  $h_1=0.50$ , 高サイクル疲労負荷の場合は  $h_2=0.25$ , 低サイクル疲労負荷の場合は  $h_3=0.45$  とするのが好ましい。

内部破壊係数  $h$  ×劣化後のばらつき係数  $D_y$  ×劣化後の強度保持率  $\eta_d = P$  とすると、 $P$  は、使用温度範囲における初期の最低平均破断強度 ( $\mu_0 \times \eta_T$ ) に対する接着強度の実力係数、即ち、設計基準強度係数を示す事になる。

劣化後のばらつき係数  $D_y$  を0.30~0.70, 劣化後の強度保持率  $\eta_d$  を0.50, 0.75として設計基準強度係数  $P$  を計算した結果を Table 3 に示す。Table 3 の結果より、最悪条件 ( $\eta_d=0.50$ ,  $D_y=0.30$ ) における設計基準強度 (接着強度の実力値) は、使用温度範囲における初期の最低平均破断強度 ( $\mu_0 \times \eta_T$ ) に対して、静的荷重負荷の場合は1/13, 低サイクル疲労負荷の場合は1/15, 高サイクル疲労負荷の場合は1/27に低下することが分かる。

4.3 設計許容強度の決定

設計許容強度は、実際に設計を行う際に用いる上限強度であり、設計基準強度を安全率  $S$  で除して求められる。Table 3 に、安全率  $S$  を1.5および2.0とした場合の、使用温度範囲における初期の最低平均破断強度 ( $\mu_0 \times \eta_T$ ) に対する設計許容強度係数  $P/S$  を示す。本論文の考え方は、すでに接着強度の温度依存性、内部破壊、強度のばらつき、並びに劣化などの強度低下に影響する因子を見込んで設計基準強度を求めているので、安全率  $S$  をそれほど高く設定する必要はないと考えられる。

Table 3 に示すように、安全率  $S$  が1.5倍で、劣化後の強度保持率  $\eta_d$  が0.5, かつ劣化後のばらつき係数  $D_y$  が0.30の場合には、設計許容強度係数は1/20~1/40となる。これでは設計許容強度が低すぎ、実用性への疑義も生じよう。しかし実際には、初期室温での平均せん断破断強度を20MPa, 温度依存係数  $\eta_T$  を0.5とすると、安全率  $S$  が1.5の場合には、設計許容強度は0.25~0.5MPaとなり、通常の製品に適用可能な、十分な強度を有していると言える。

**Table 3** Specified design strength factor  $P$  and allowable design strength factor  $P/S$  (Ratio to the lowest average strength in application temperature range)

Internal failure factor $h$	After deterioration		Specified design strength factor $P$	Allowable design strength factor $P/S$	
	Strength retention $\eta_d$	Dispersion coefficient $D_y$	Safety factor $S=1.0$	Safety factor $S=1.5$	Safety factor $S=2.0$
			$P=h \cdot D_y \cdot \eta_d$	$P/1.5$	$P/2.0$
Static load $h_1=0.50$	0.75	0.7	0.2625 (1/4)	0.1750 (1/6)	0.1313 (1/8)
		0.6	0.2250 (1/4)	0.1500 (1/7)	0.1125 (1/9)
		0.5	0.1875 (1/5)	0.1250 (1/8)	0.0938 (1/11)
		0.4	0.1500 (1/7)	0.1000 (1/10)	0.0750 (1/13)
		0.3	0.1125 (1/9)	0.0750 (1/13)	0.0563 (1/18)
	0.50	0.7	0.1750 (1/6)	0.1167 (1/9)	0.0875 (1/11)
		0.6	0.1500 (1/7)	0.1000 (1/10)	0.0750 (1/13)
		0.5	0.1250 (1/8)	0.0833 (1/12)	0.0625 (1/16)
		0.4	0.1000 (1/10)	0.0667 (1/15)	0.0500 (1/20)
		0.3	0.0750 (1/13)	0.0500 (1/20)	0.0375 (1/27)
Low cycle fatigue $h_3=0.45$	0.75	0.7	0.2363 (1/4)	0.1575 (1/6)	0.1182 (1/8)
		0.6	0.2025 (1/5)	0.1350 (1/7)	0.1013 (1/10)
		0.5	0.1688 (1/6)	0.1125 (1/9)	0.0844 (1/12)
		0.4	0.1350 (1/7)	0.0900 (1/11)	0.0675 (1/15)
		0.3	0.1013 (1/10)	0.0675 (1/15)	0.0507 (1/20)
	0.50	0.7	0.1575 (1/6)	0.1050 (1/10)	0.0788 (1/13)
		0.6	0.1350 (1/7)	0.0900 (1/11)	0.0675 (1/15)
		0.5	0.1125 (1/9)	0.0750 (1/13)	0.0563 (1/18)
		0.4	0.0900 (1/11)	0.0600 (1/17)	0.0450 (1/22)
		0.3	0.0675 (1/15)	0.0450 (1/22)	0.0338 (1/30)
High cycle fatigue $h_2=0.25$	0.75	0.7	0.1313 (1/8)	0.0875 (1/11)	0.0657 (1/15)
		0.6	0.1125 (1/9)	0.0750 (1/13)	0.0563 (1/18)
		0.5	0.0938 (1/11)	0.0625 (1/16)	0.0469 (1/21)
		0.4	0.0750 (1/13)	0.0500 (1/20)	0.0375 (1/27)
		0.3	0.0563 (1/18)	0.0375 (1/27)	0.0282 (1/35)
	0.50	0.7	0.0875 (1/11)	0.0583 (1/17)	0.0438 (1/23)
		0.6	0.0750 (1/13)	0.0500 (1/20)	0.0375 (1/27)
		0.5	0.0625 (1/16)	0.0417 (1/24)	0.0312 (1/32)
		0.4	0.0500 (1/20)	0.0333 (1/30)	0.0250 (1/40)
		0.3	0.0375 (1/27)	0.0250 (1/40)	0.0188 (1/53)

Table 3 から分かるように、劣化による接着強度の低下をできるだけ少なくする、乃至はばらつき係数を大きくすることで、例えば 1/40 であった設計許容強度係数を 1/20 以上に大きくすることが可能である。水分劣化による強度低下は、接着部の寸法から設計でき<sup>1,2,4)</sup>、また表面改質などによりばらつきを低減させることも可能である。

なお、経緯は不明であるが、構造接着においては、従来から、安全率は初期強度の 30 倍~40 倍とされているが、今回の結果と図らずも一致したことは極めて興味深い。

### 5. 設計手順

これまでに述べた設計許容強度の考え方により接着部の設計を行う手順を以下に示す。まず、接着を適用しようとしている部品の接着系（被着材料、表面状態、接着剤の種類・特性、接着条件、構造）を最適化し、高信頼性接着の基本条件、即ち (1) 凝集破壊率 40% 以上、並びに (2) 初期の変動係数  $CV_0 \leq 0.10$  以下、を満たすことが必要である。接着強度の温度依存性も測定し、併せて、設計段階で接着部の許容不良率  $F(x)$  と接着部に加わる力を設定しておく。

これらの準備の後、接着部に負荷される荷重を使用温度範囲における最低平均接着強度で除し、Table 3 の設計許容強度係数と比較する。計算結果が Table 3 の数値より小さければそのまま適用しても大きな問題は生じないと考えられる。一方、計算結果が Table 3 の数値より大きければ、接着剤の変更など、なんらかの対策を講じる必要がある。

### 6. 結 言

上記の設計基準強度、設計許容強度の考え方で接着接合部を設計することにより、多大な技術開発や検証試験なしで接着を短期間で適用できると考えられる。ただし、界面破壊が生じ、かつばらつきが大きいなど高信頼性接着の基本条件を満たしていない場合には、その適用は避けるべきであり、部品の接着系（被着材料、表面状態、接着剤の種類・特性、接着条件、構造）を最適化して、高信頼性接着の基本条件、即ち (1) 凝集破壊率 40% 以上、及び (2) 初期の変動係数  $CV_0 \leq 0.10$  以下、を満たすことが重要である。各係数の高精度化のために今後もデータの蓄積が必要で

あることは言うまでもないが、それと同時に、本報告に示した設計基準強度、設計許容強度及び設計手順を早期に明確化することも、接着が汎用的接合方法と認知されるために重要と考えられる。

本論文の内容は、2013年6月21日開催の第51回日本接着学会年次大会で討論発表したものである。

#### 参 考 文 献

- 1) 原賀康介, 日本接着学会誌, 43, 319 (2007).
- 2) 原賀康介, 接着の技術誌, 32(3), 62 (2012).
- 3) 原賀康介, 接着の技術誌, 24(2), 58 (2004).
- 4) 原賀康介, 日本接着学会誌, 39, 448 (2003).
- 5) 原賀康介, 日本接着学会誌, 40, 564 (2004).

### < Technical Report >

#### A Concept of Specified Design Strength and Allowable Design Strength in the Strength Design of Adhesively Bonded Joints.

Kosuke HARAGA \*

\* HARAGA Adhesion Technology Consulting Co., Ltd.  
1-9-301 Midoricho, Ashiya, Hyogo 659-0042 Japan  
(Accepted for publication : December 4, 2013)

#### Abstract

It is necessary to establish the design standard of adhesively bonded joints because adhesion is not recognized as a general joining method. Therefore, a method for obtaining the specified design strength and allowable design strength of a joint is proposed.

In this proposal, (1) temperature dependency of strength, (2) strength dispersion, (3) internal failure and (4) deterioration are considered as a decrease factor of strength for adhesive bonding.

Specified design strength is calculated by the proposal method. As a result, specified design strength is estimated as 1/13-1/27 of the initial lowest average strength in the application temperature range. When the safety factor is 1.5 times, allowable design strength is 1/20-1/40.

**Key words :** Specified design strength, Allowable design strength, Strength dispersion, Internal failure, Deterioration

(Received : July 3, 2013)

---