

# 《 原賀式『Cv 接着設計法』 》(改訂法)

作成:2020/3/19 Ver.3.0 Rev.1.1

原賀式『Cv 接着設計法』は、許容不良率、ばらつき、劣化、内部破壊、温度による強度低下などを考慮して、高品質な接着を簡易に達成するための設計法です。今回、温度係数を追加し、さらにわかりやすくした<改訂法>を開発しましたので掲載いたします。

●原賀式「Cv 接着設計法」、「設計基準強度と設計許容強度の算出法」は、日本海事協会 (ClassNK) の「構造用接着剤使用のためのガイドライン(2015/12 発行)」の設計許容強度の計算基準として採用されています。

## 1. 簡易に設計するための設計基準

### 1.1 設計基準の必要性

製品の組立てに接着を使いたいと思って設計基準なるものを探してみても見つからない、接着剤メーカーに問合せでも使用できるかどうかの明確な回答は得られない、結局は接着の採用をあきらめざるを得ないという経験をされた方は多いと思います。この点から、「接着」は、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と言わざるを得ません。では、各種の構造体で接着が高度に利用され、実績も得られているものはどうやって達成されているのかというと、適用までには多大な研究開発や検証試験がなされてようやく採用されているのです。これには、十分な開発期間と開発リソースが必要なため、接着の採用によって大きな効果が得られる場合にしか採用は困難とも言えます。

筆者は信頼性に優れた接着を汎用的に使用できることを目的として長年種々の研究開発を行ってきました。その中で、これまでに、

(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点を満たすことが高信頼性・高品質接着の基本であることを示してきました。しかし、これだけでは「簡易に設計を行う」には不十分です。第3の条件として、「設計基準に従って強度設計を行うこと。」という項目を追加する必要があります。

そこで、以下では、簡易に接着強度設計を行うための設計基準の考え方と求め方について説明します。

### 1.2 設計基準強度、設計許容強度の考え方

接着強度は、破断試験で求められることが一般的ですが、破断強度を接着強度の実力値と考えるのは危険なことです。そこで、通常用いられている破断強度や平均値、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て、接着強度の実力値を求めて、その強度を設計基準強度とします。

接着強度の低下に影響する因子として、

(1)接着強度のばらつき、

- (2)劣化による接着強度の低下と強度ばらつきの増大、
- (3)内部破壊の発生、
- (4)接着強度の温度依存性を考えます。

設計許容強度は、接着強度の実力値である設計基準強度を安全率で除した強度となります。

ここでは、1.1 に示した信頼性に優れた接着を行うための基本条件の(1)(2)を満たすところまで作り込みがなされた接着系であることを前提とするので、破壊状態は凝集破壊の場合について考えます。

### 1.3 接着強度の低下に影響する因子

#### 1.3.1 接着強度のばらつき

##### (1)ばらつき係数 $d$

ここでは、平均接着強度ではなく、接着強度のばらつきを考慮して、**図 1** に示すように、製品の設計段階であらかじめ設定されている許容不良率  $F(x)^{1,2)}$  の上限強度  $p$  を考えます。許容不良率  $F(x)$  は、設計段階で決められますが、製品によって 1/10 万～1/1000 万程度に設定される場合が多いようです<sup>1,2)</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なることが分かっている<sup>1-3)</sup> ので、ここでは接着強度の分布を正規分布として扱います。

**図 1** に示すように、平均接着強度  $\mu$  と許容不良率  $F(x)$  が同じであっても、ばらつき（変動係数  $Cv$ ）が異なると許容不良率の上限強度  $p$  は異なります。以後、**平均強度  $\mu$  に対する許容不良率の上限強度  $p$  の比率  $(p/\mu)$  をばらつき係数  $d$**  と示します。ばらつき係数  $d$  がどのくらいあればよいかは設計段階で決めれば良いのですが、筆者の考えでは、悪くても 0.5、好ましくは 0.7 程度はほしいと思っています。

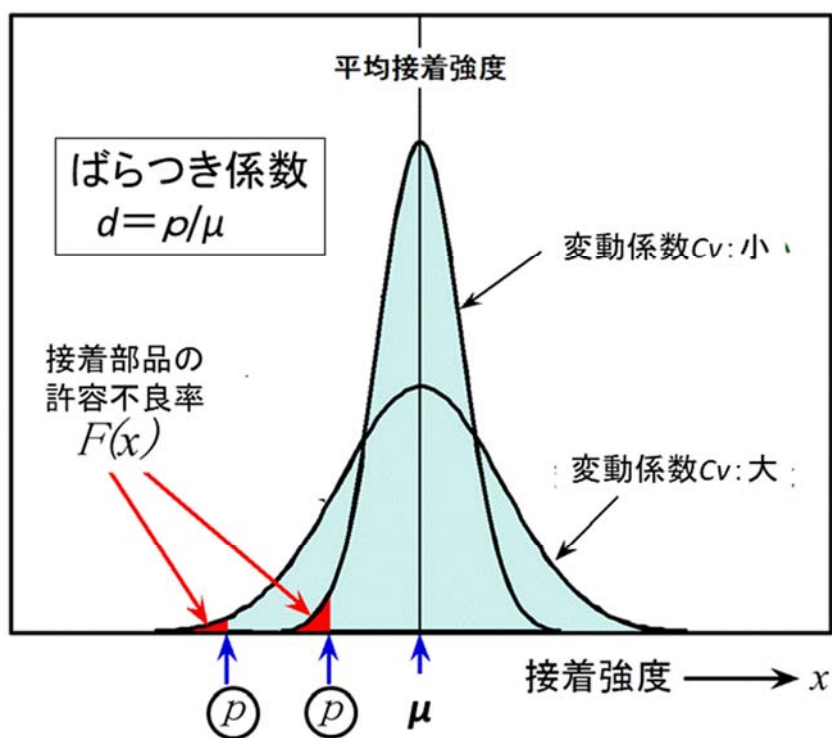


図 1. 正規分布における許容不良率  $F(x)$  の上限強度  $p$  とばらつき係数  $d$

ばらつき係数  $d$ 、変動係数  $C_v$ 、許容不良率  $F(x)$  の関係をグラフ化すると、**図 2** のようになります。この図から、接着強度の変動係数  $C_v$  と設定されている許容不良率  $F(x)$  からばらつき係数  $d$  を容易に求めることができます。

しかし、許容不良率  $F(x)$  の直線の傾きは、正規分布の確率密度関数から計算する必要があるため、任意の許容不良率におけるばらつき係数を求めるのは容易ではありません。

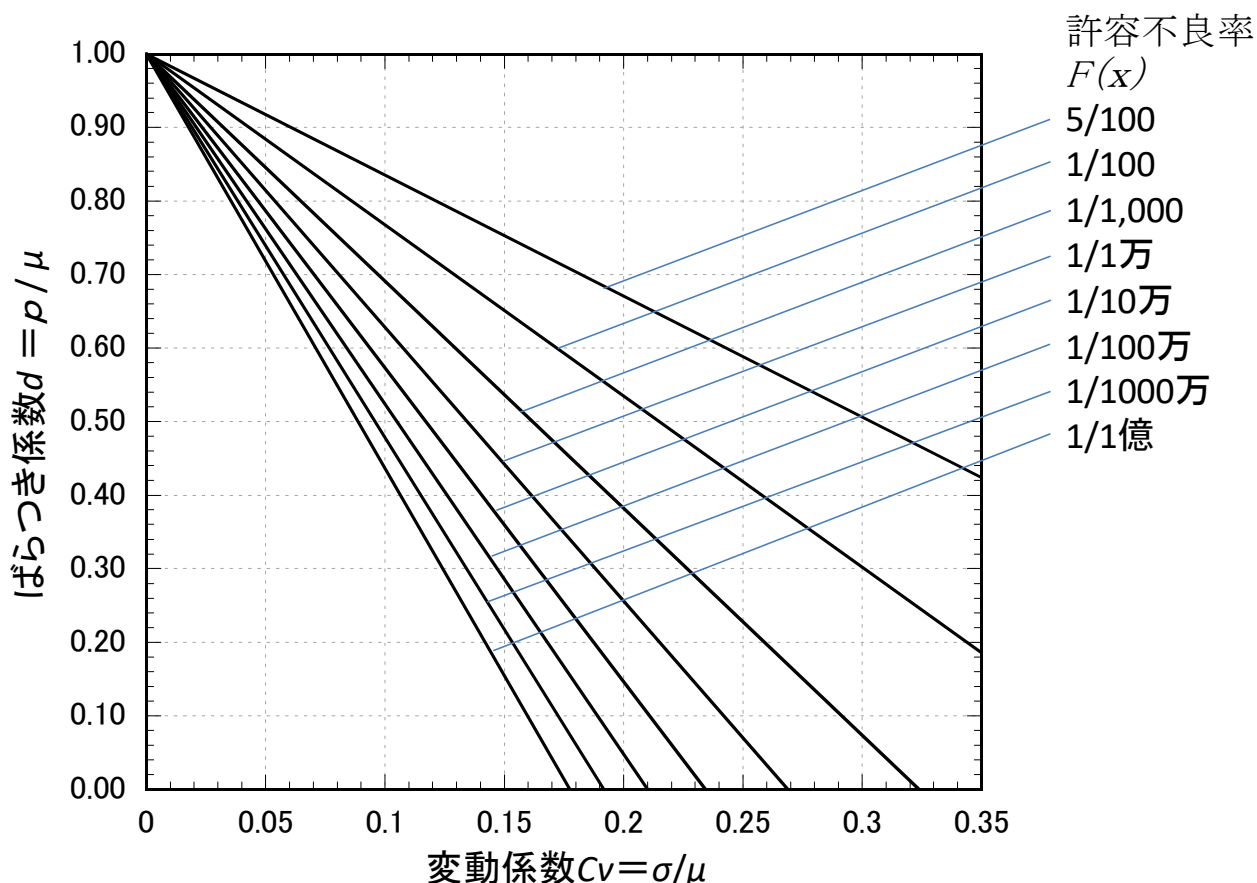


図 2. 許容不良率  $F(x)$ 、変動係数  $C_v$  とばらつき係数  $d$  の関係図

## (2) 工程能力指数 $C_{pL}$ と信頼性指数 $R$

そこで、許容不良率と類似の意味を持つ工程能力指数  $C_p$  を用います。

工程能力指数  $C_p$  は、**図 3** に示すように、一般に、平均値  $\mu$  に対して、上側規格値  $USL$  と下側規格値  $LSL$  が規定されていて、 $USL$  以上、 $LSL$  以下のものは不合格とされ、最終の検査によって排除されます。

工程能力指数  $C_p$  は、 $C_p = (USL - LSL) / 6\sigma$  ( $\sigma$  は標準偏差) と定義されますが、強度のように上側規格値が不要な場合は、下側規格値のみが規定され、 $C_{pL}$  と表記され、 $C_{pL} = (\mu - LSL) / 3\sigma$  と定義されます。 $C_p$  や  $C_{pL}$  は、1.00、1.33、1.50、1.67 などに設定される場合が一般的で、値が大きいくほど不良率が低いということになります。1.00 というのは、いわゆる  $3\sigma$  管理ということです。

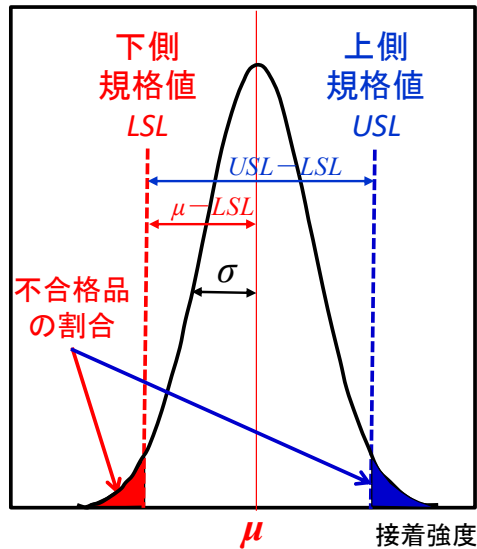


図3. 工程能力指数の説明図

しかし、接着強度は非破壊では検査できないため、下側規格値  $LSL$  を決めても、 $LSL$  以下の強度のものを排除できず、市場に流れ出ることとなります。この点から、接着強度においては、下側規格値  $LSL$  は、検査の規格値としての意味はなく、許容不良率以上の不良品を市場に流出させないための規格値、即ち、許容不良率  $F(x)$  の上限強度  $p$  と考えるのが妥当です。

そこで、接着強度に関しては、図4に示すように、 $LSL$  を許容不良率の上限強度  $p$  と置き換えて考えます。工程能力指数という言葉では工程管理の手法と誤解されやすいので、以下、工程能力指数の考え方を借りて、信頼性指数  $R$  を次のように定義します。

$$\text{信頼性指数 } R = (\mu - p) / 3\sigma \cdots (1)$$

信頼性指数  $R=1.00$ 、 $1.33$ 、 $1.50$ 、 $1.67$  は、許容不良率  $F(x)$  で表すと、それぞれ  $1.35/1000$ 、 $3.17/10$  万、 $3.40/100$  万、 $2.87/1000$  万に相当します。

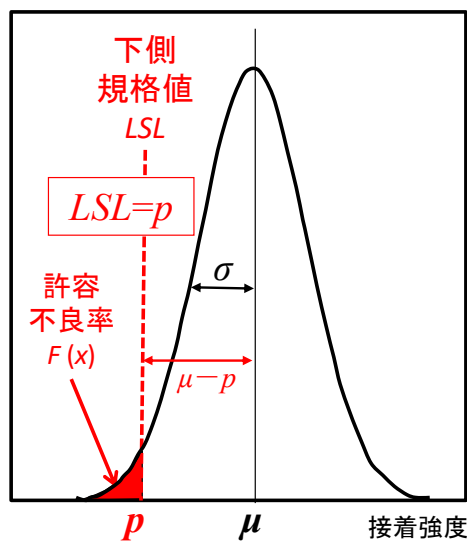


図4. 信頼性指数  $R$  の説明図

変動係数  $Cv = \sigma/\mu$ 、 $p/\mu$  はばらつき係数  $d$  なので、(1)式から、(2)式が得られます。

$$\text{ばらつき係数 } d = p/\mu = 1 - 3R \cdot Cv \quad \dots (2)$$

また、(2)式から、変動係数  $Cv$  は、

$$\text{変動係数 } Cv = (1-d)/3R \quad \dots (3)$$

となります。

(2)式をグラフ化すると、直線の傾きが $-3R$ の図5となります。図5では、許容不良率  $F(x)$  と信頼性指数  $R$  の関係もよくわかります。

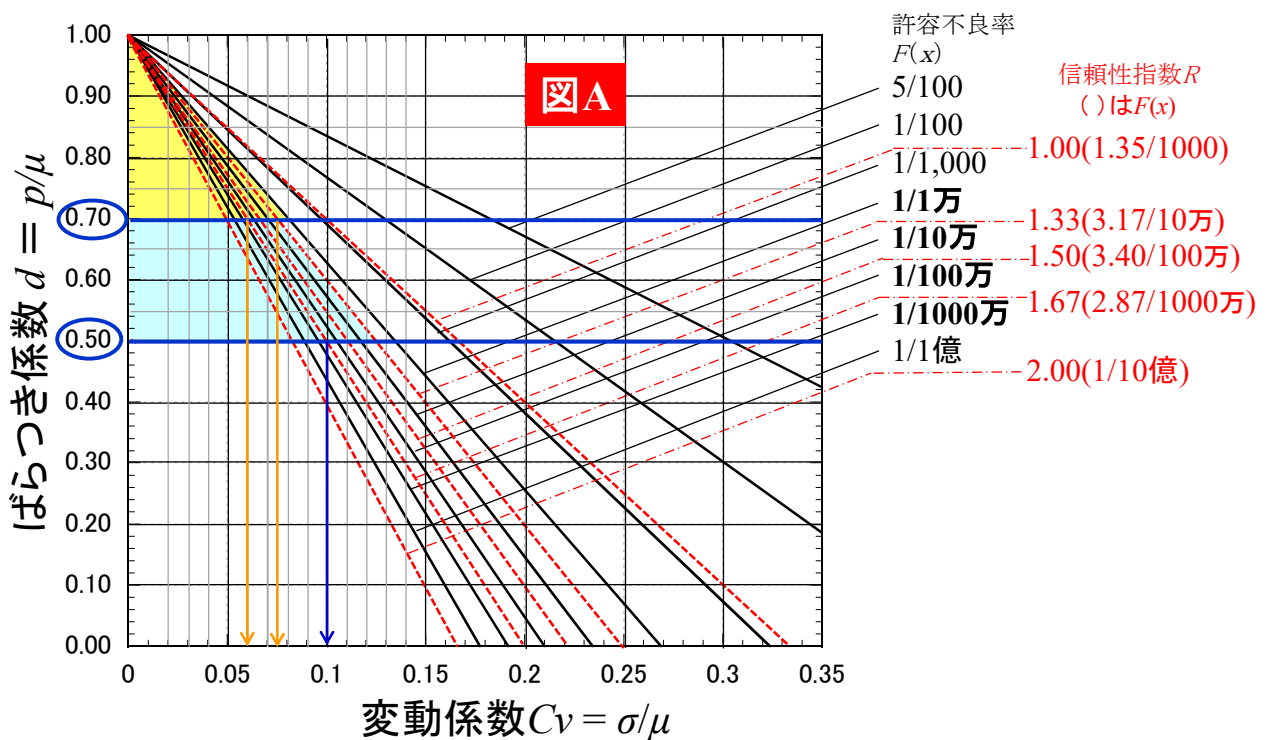


図5. 信頼性指数 $R$ 、許容不良率 $F(x)$ 、変動係数 $Cv$ とばらつき係数 $d$ の関係図 ( $d = 1 - 3R \cdot Cv$ )

### 1.3.2 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、劣化後の強度で考えます。

接着部の劣化によって図6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ります<sup>1-5)</sup>。

ここで、劣化後の平均強度を $\mu_y$  ( $y$  は劣化後を意味します)、初期の平均強度を $\mu_{R0}$  ( $R$  は室温、 $0$  は初期を意味します)として、 $\mu_y / \mu_{R0}$  を強度保持率 $\eta_y$ とします。劣化後の強度保持率 $\eta_y$ は、高信頼性接着においては、悪くても $0.5$ 程度を確保していることは必要でしょう。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などが懸念されるためです。

劣化後のばらつきの増大は接着強度の変動係数  $Cv_{R0}$ が増加するとして扱います<sup>1-5)</sup>。ここでは、劣化後の変動係数  $Cv_y$ は、初期の変動係数  $Cv_{R0}$ の  $k$  倍に増大するとします。 $k$  は、筆者の経

験値ですが、初期に凝集破壊している場合は、接着製品の耐用年数や使用環境や応力の厳しさによって 1.0~1.5 倍と考えれば良いでしょう<sup>1-5)</sup>。

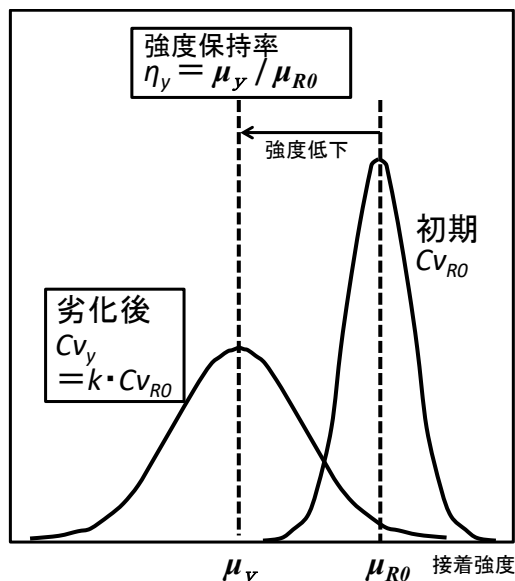


図6. 劣化による接着強度の低下と強度ばらつきの増大

### 1.3.3 内部破壊

#### (1)内部破壊

図7に示すように、一般に、破断荷重や最大荷重値が接着強度として扱われています。しかし、最終的に破断する以前に、接着部の内部では図に示すように破壊が繰返し起こっています。このように、破断の前に低い荷重域から生じる破壊を「内部破壊」と呼んでいます。内部破壊は目で見えにくいため気が付くことは少ないと思いますが、破断の少し前にビシッビシッと音がして、そろそろ壊れるなど感じることは経験されているのではないのでしょうか。

ここでは、真の接着強度を内部破壊が最初に生じる強度、即ち、「内部破壊発生開始強度」と考えます。

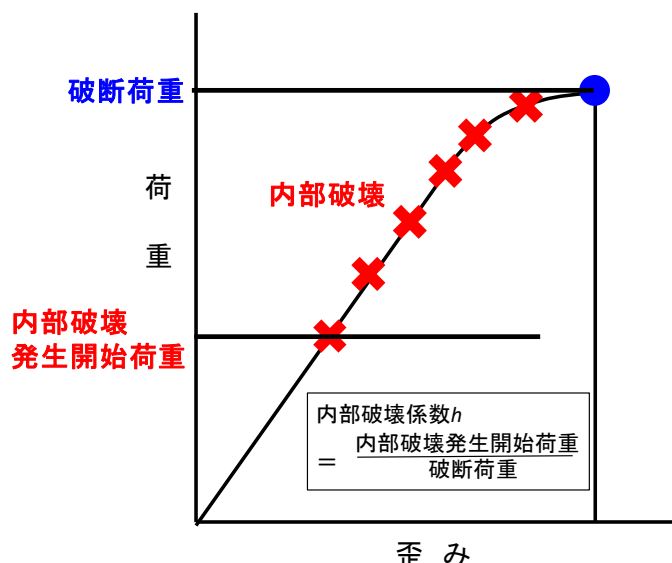


図7. 接着継手の荷重-歪み線図における内部破壊の発生の模式図

## (2)内部破壊係数

破断荷重に対する内部破壊発生開始荷重の比を内部破壊係数  $h$  とし、次の三つの場合について考えます。

①静的荷重荷重のみが加わる場合。内部破壊係数を  $h_1$  とします。

②繰返し疲労などの高サイクル疲労が加わる場合。係数を  $h_2$  とします。

③ヒートサイクルやヒートショックなどの熱応力による低サイクル疲労が加わる場合。係数を  $h_3$  とします。 s

## (3)静荷重荷重のみが加わる場合の内部破壊係数 $h_1$

静的荷重荷重の場合の内部破壊を AE (Acoustic Emission) を用いて測定した結果の一例を表 1 に示しました<sup>1,3,4)</sup>。この結果から、凝集破壊の場合は、破断荷重の 51%以上の荷重荷重で AE が発生しています。そこで、静荷重荷重の場合の内部破壊係数  $h_1$  は 0.5 とします。

表 1. A E による内部破壊の評価結果

破壊状態	試料番号	AE発生開始荷重比
凝集破壊	1	51 %
	2	76 %
	3	100 %
	平均	76 %
界面破壊	1	7 %
	2	8 %
	3	31 %
	平均	15 %

AE発生開始荷重比 = AE発生開始荷重 / 破断荷重

## (4)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の結果から求めます。疲労試験の結果の一例を図 8 に示しました<sup>1,3)</sup>。繰返し疲労における破壊は、内部破壊の蓄積によるものと考え、静的破断荷重に対する  $10^7$  回の高サイクル疲労における最大負荷荷重の比を内部破壊係数  $h_2$  とします。凝集破壊の場合は、一般に、 $h_2$  は静的破断荷重の  $1/3 \sim 1/4$  程度なので、 $h_2 = 0.25$  とします。

## (5)熱応力の繰返しによる低サイクル疲労の場合の内部破壊係数 $h_3$

ヒートサイクルやヒートショックでは、外力の繰返しの場合より周期が長いため、静的破断荷重に対する  $10^4$  回における最大負荷荷重の比を内部破壊係数  $h_3$  とし、 $h_3 = 0.4 \sim 0.5$  とします。

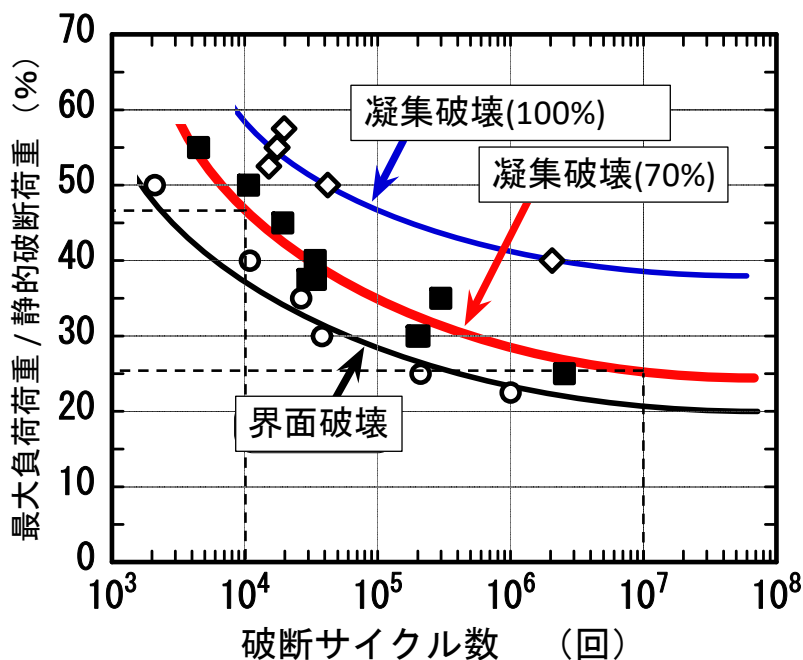


図8. 疲労試験結果

#### 1.3.4 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で考えます。図9に示すように、樹脂系の接着剤の場合は、温度によって接着強度が変化します。一般に、高温やかなりの低温領域では室温付近の強度に比べて接着強度が低下します。

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 $\mu_T$  (Tは温度を意味します) とし、室温での接着強度 $\mu_{R0}$  に対する $\mu_T$ の比率 ( $\mu_T/\mu_{R0}$ ) を温度係数 $\eta_T$ とします。

$\mu_{R0}$ 、 $\mu_T$ は、接着剤のカatalogや接着剤メーカーへの問合せで容易にわかるので、温度依存係数 $\eta_T$ は容易に求めることができます

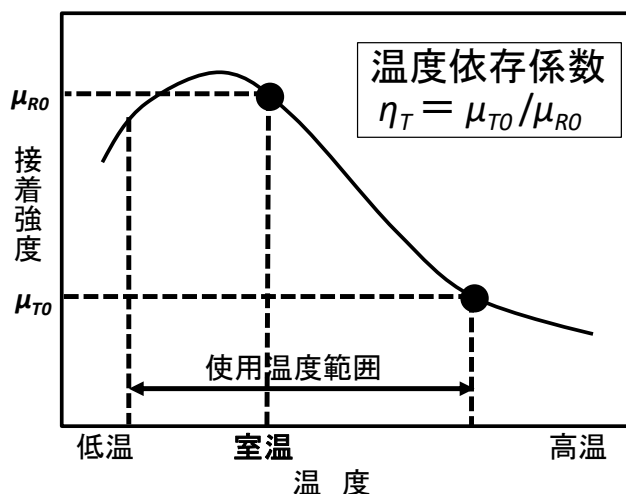


図9. 接着強度の温度依存性の模式図と温度依存係数 $\eta_T$



## 1.4 設計基準強度と設計許容強度の算出式

### 1.4.1 設計基準強度

これまでに述べてきたように、設計基準強度、即ち、接着強度の実力強度は、**図 10** に示すように、初期の室温における平均破断強度 $\mu_{R0}$ に対して、設定された想定不良率における初期のばらつき係数 $d_{R0}$  ( $=p_{R0}/\mu_{R0}$ )、劣化後の強度保持率 $\eta_y$ 、劣化による変動係数の増加率 $k$ 、内部破壊係数 $h$ 、使用温度による強度低下率（温度係数） $\eta_T$ 、などを考慮した $p_{yTh}$ となります。

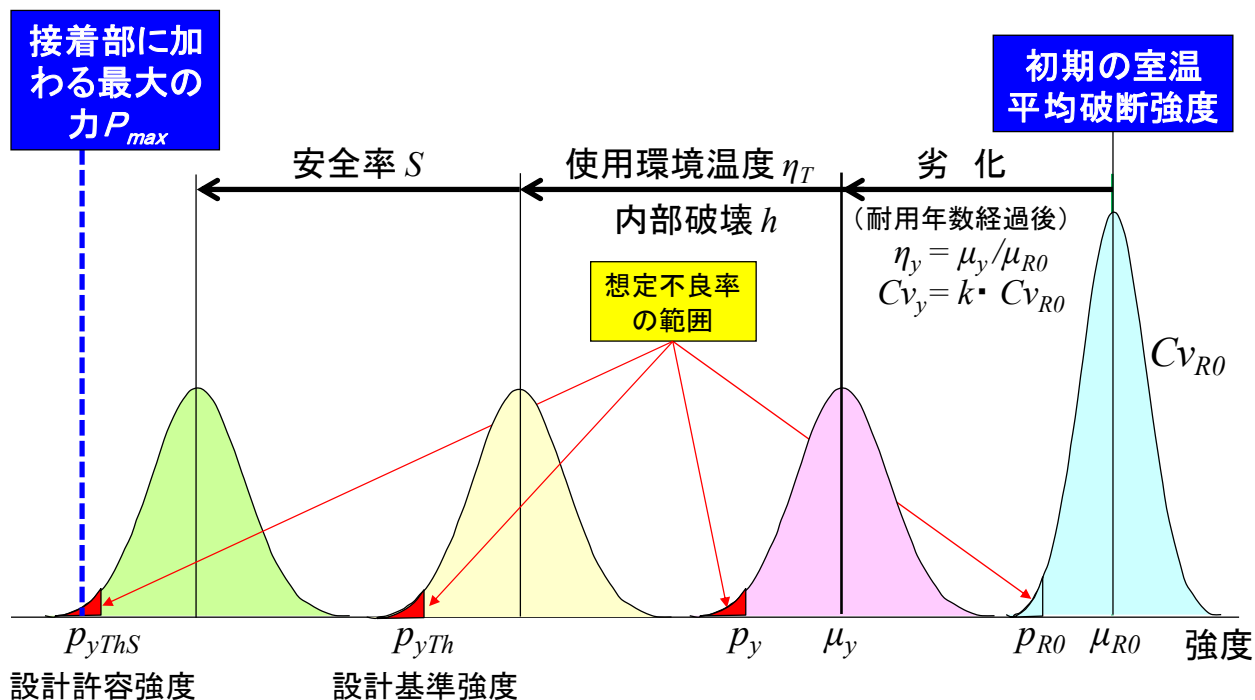


図10. 設計基準強度、設計許容強度と初期の室温平均破断強度の関係

### 1.4.2 設計基準強度の算出式

まず、劣化後の許容不良率の上限強度 $p_y$ を求めます。

$d_y = p_y / \mu_y$ ,  $\mu_y = \mu_{R0} \cdot \eta_y$ , なので、 $d_y = p_y / (\mu_{R0} \cdot \eta_y)$ 、

(2)式より、 $d_y = 1 - 3R \cdot C_{v_y}$ ,  $C_{v_y} = k \cdot C_{v_{R0}}$  なので、 $d_y = p_y / (\mu_{R0} \cdot \eta_y) = 1 - 3R \cdot k \cdot C_{v_{R0}}$  となり、(4)式が得られます。

$$p_y = \mu_{R0} \cdot \eta_y (1 - 3R \cdot k \cdot C_{v_{R0}}) \dots (4)$$

次に、内部破壊と使用温度による強度低下を考慮します。すると、**図 10** の $p_{yTh}$ は、(5)式となり、接着強度の実力値である**設計基準強度** $p_{yTh}$ が得られます。

$$p_{yTh} = \mu_{R0} \cdot \eta_y (1 - 3R \cdot k \cdot C_{v_{R0}}) \cdot \eta_T \cdot h \dots (5)$$

### 1.4.3 設計許容強度

設計基準強度で設計することは適当ではないため、さらに安全率 $S$ を考慮して設計許容強度を求めます。

**設計許容強度** $p_{yThS}$ は、(6)式となります。

$$p_{yThS} = \mu_{R0} \cdot \eta_y (1 - 3R \cdot k \cdot C_{vR0}) \cdot \eta_T \cdot h / S \quad \cdot \cdot (6)$$

(6)式で、設計許容強度を試算してみましょう。

初期の平均破断強度 $\mu_{R0}$ が 20MPa で、初期の変動係数  $C_{vR0}$ が 0.10 まで作り込まれていて、要求される信頼性指数  $R$  (工程能力指数と考えても良い) が 1.50 (許容不良率  $F(x)$ で表すと 3.40/100 万)、劣化後の強度保持率 $\eta_y$ が 0.7、劣化による変動係数の増加率  $k$ が 1.2、温度係数  $\eta_T$ が 0.7、内部破壊係数  $h$ が 0.5、安全率  $S$ を 1.5 と仮定すると、(6)式から、設計許容強度  $p_{yThS}$ は 1.5MPa となります。即ち、上記の場合、設計許容強度は、室温の平均破断強度の約 1/13 となります。かなり低いと思われるかもしれませんが、これが実際のところですよ。

### 1.5 Cv 接着設計法

製品設計の初期の段階で、接着を使うか他の接合方法を使うかの選択に迷うことは多いと思います。接着に対する不安の一つに、どのくらいの接着面積をとればよいのかわからないということがあります。評価試験などを行わないで、必要な接着面積を簡易に見積もれば助かります。また、接着強度のばらつきをどの程度に抑えなければならないかも知りたいところです。

これらを、評価試験を行わずに、必要な接着面積と作り込みの変動係数を簡易に見積もる方法が「Cv 接着設計法」です。

製品の耐用年数経過後に、想定不良率以上の不良を出さないためには、**図 10** に示すように、接着部に加わる最大の力  $P_{max}$  に対して、設計許容強度  $p_{yThS}$  は、同じかそれ以上であることが必要です。

$$p_{yThS} \geq P_{max}$$

**接着部に加わる最大の力  $P_{max}$  に対する、必要な接着部の初期の平均破断強度 $\mu_{R0}$ の倍率**は、(6)式の逆数 $\mu_{R0}/p_{yThS}$  以上必要であり、(7)式で求めることができます。

$$\mu_{R0}/P_{max} \geq \mu_{R0} / p_{yThS} = S / \{ \eta_y (1 - 3R \cdot k \cdot C_{vR0}) \cdot \eta_T \cdot h \} \quad \cdot \cdot (7)$$

しかし、初期の変動係数  $C_{vR0}$  は、わかっていないことが多いため困ります。(3)式より、 $C_{vR0} = (1-d_{R0}) / 3R$  なので、(7)式に代入すると、(8)式が得られます。

$$\mu_{R0}/P_{max} \geq \mu_{R0} / p_{yThS} = S / \{ \eta_y \{ 1 - k \cdot (1-d_{R0}) \} \cdot \eta_T \cdot h \} \quad \cdot \cdot (8)$$

初期の平均破断強度が $\tau$ (タウ)MPa の接着剤と仮定すると、必要な接着面積は、 $\mu_{R0}/\tau$ で求めることができます。

例えば、接着部に加わる最大力  $P_{max}$  が 200N、初期のばらつき係数  $d_{R0}$  の要求値が 0.60 以上で、劣化後の強度保持率 $\eta_y$ を 0.7、劣化による変動係数の増加率  $k$ を 1.2、温度係数 $\eta_T$ を 0.7、内部破壊係数  $h$ を 0.5、安全率  $S$ を 1.5 と仮定した場合、(8)式から、 $\mu_{R0}$ は 2355N 以上必要となります。初期の平均破断強度 $\mu_{R0}$ が 20MPa の接着剤を用いると仮定すると、必要な接着面積は、 $\mu_{R0}/\tau$ から 118mm<sup>2</sup>以上 (例えば、10mm×11.8mm) 有れば良いことがわかります。この程度の面積が可能となれば、次に、実際に接着作業を行うときに、初期の変動係数をどの

程度まで作り込まなければならないかを知る必要があります。ただし、作り込みの程度は、要求される信頼度（信頼性指数  $R$ ）によって変化するので、 $R$  を仮定しなければなりません。例えば、 $R$  を 1.50 と仮定すると、(3)式より、 $Cv_{R0} = (1 - d_{R0}) / 3R$  なので、 $Cv_{R0}$  は 0.067 以下で生産する必要があることがわかります。

ここで、初期の変動係数  $Cv_{R0}$  が 0.067 以下になるように生産するのはちょっと厳しいな、0.10 程度で作りたいなと思った場合は、(7)式を用いて、初期の変動係数  $Cv_{R0}$  を仮定して必要な面積を求めることができます。

例えば、上の条件で、 $Cv_{R0}$  を 0.10 とすると、(7)式から、 $\mu_{R0}$  は 2662N 以上必要となり、 $\mu_{R0}/\tau$  から  $133\text{mm}^2$  以上（例えば、 $10\text{mm} \times 13.3\text{mm}$ ）必要なことがわかります。少し面積を広げることで、楽に生産できることがわかります。

#### 参考資料

- 1)原賀康介；接着の技術誌，Vol.32, No.3, P.62 (2012).
- 2)原賀康介；接着の技術誌，Vol.24, No.2, P.58 (2004).
- 3)原賀康介；日本接着学会誌，Vol.39, No.12, P.448 (2003).
- 4)原賀康介；日本接着学会誌，Vol.43, No.8, P.319 (2007).
- 5)原賀康介；日本接着学会誌，Vol.40, No.11, P.564 (2004).