

## &lt; 総 説 &gt;

原賀 康介

(受理:平成27年3月2日)

ばらつき, 劣化, 内部破壊を考慮して  
高品質を確保する「 $C_v$  接着設計法」The “ $C_v$  Design Method” for High Quality Adhesive Joints原賀 康介\*  
Kosuke HARAGA

## 1. はじめに

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, 接着剤による接合は, 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性を述べてきた<sup>1,2)</sup>。また, 多大な評価試験なしで簡易に強度設計を行うために, 接着強度設計における設計基準強度と設計許容強度の考え方を示してきた<sup>3)</sup>。

ここでは, これらをさらに発展させ, 想定以上の不良を発生させないという「信頼性」と, ばらつきの少なさという「品質」を両立させ, 接着部に加わる力に対して何倍の強度になるように接着部を設計すれば良いかを簡易に求められる設計法を開発したので, これについて解説する。なお, この設計法では, 変動係数  $C_v$  で考えて行くので, 「 $C_v$  接着設計法」と名付けた。

## 2. 信頼性と品質

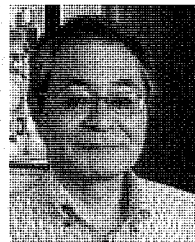
「信頼性に優れている」というのは, 製品や部品の耐用年数など, 製品や部品が実際に使用されるある一定の期間に発生する不良率が低いということである。発生不良率を

低くするために, 製品や部品の開発初期の段階で, 一定期間に発生する許容できる不良率の上限値を決めて, それを満足するように開発が行われる。この一定期間に発生する許容できる不良率は「許容不良率」と呼ばれている。一般に, 耐用年数までに発生する許容不良率は, 製品や部品の重要さによって1/10万, 1/100万, 1/1000万などに規定されることが多く, 数字が小さいほど信頼性が高く設定されているということである。

不良が発生しなければ製品や部品としては問題ないともいえるが, 製品や部品ごとの特性のばらつきが大きければ「品質に優れている」とは言いがたい。即ち, 図1に示すように, 品質というのは顧客の満足度であり, 壊れないという「信頼性」はその構成要素の一部である。「高品質」といえるには, 不良が出ないことはもちろんであるが, 「特性のばらつきが小さい」ことも重要である。

特性のばらつきの規定としては, 「工程能力指数  $C_p$ 」が広く使われている。工程能力指数では, 図2に示すように, 特性の平均値  $\mu$  に対して, 上側規格値  $USL$  と下側規格値

## 原賀 康介



所属: 株式会社 原賀接着技術コンサルタント

役職: 専務取締役 首席コンサルタント

学位: 工学博士

専門: 接着技術 (特に構造接着と接着信頼性保証技術)

略歴: 1973年京都大学工学部工業化学科卒業, 同年~2012年 三菱電機(株)生産技術研究所, 材料研究所, 先端技術総合研究所に勤務, 2012年3月原賀接着技術コンサルタントを設立し, 各種企業における接着課題の解決へのアドバイスや社員教育などを行っている。

\* (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

HARAGA Adhesion Technology Consulting Co., Ltd.

1-9-301 Midori-cho, Ashiya, Hyogo 659-0042, Japan

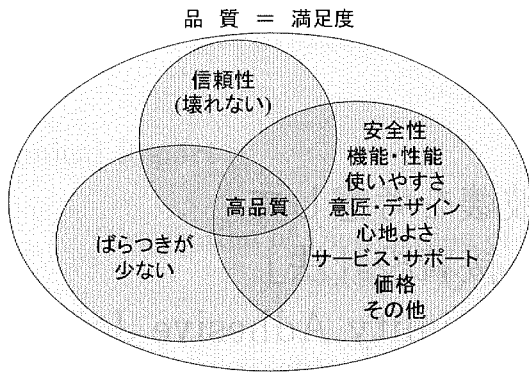


図1 高品質の条件—壊れなくても「ばらつき」が大きければ「高品質」とは言えない—

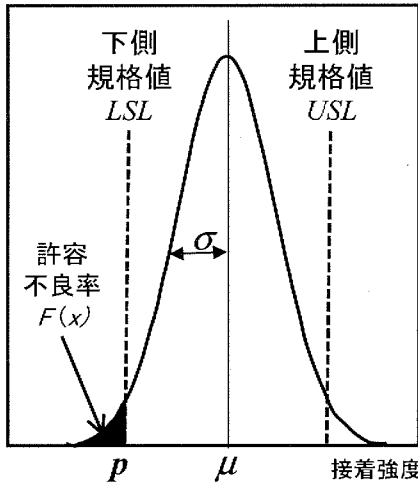


図2 工程能力指数における規格値と許容不良率(正規分布)

LSL が規定されており, 上側規格値以上, 下側規格値以下のものは不合格とされる。上側規格値と下側規格値の差が小さいほど品質が高く設定されているということである。工程能力指数  $C_p$  は, (1) 式で定義されている。

$$C_p = (USL - LSL) / 6\sigma \quad (\sigma \text{ は標準偏差}) \quad (1)$$

接着強度など上側規格値を規定する必要がない場合は, 下側規格値のみが規定され,  $C_{pL}$  と表記され, (2) 式で定義される。

$$C_{pL} = (\mu - LSL) / 3\sigma \quad (\mu \text{ は平均値}) \quad (2)$$

$C_{pL}$  は, 1.33, 1.50, 1.67 などに設定される場合が多い。 $C_{pL}$  の値は, 品質のレベルを示すものではなく, 不合格品の割合を規定するもので,  $C_{pL}$  値が大きいほど不合格品の割合が少ないということである。品質の高さ(ばらつきの少なさ)は下側規格値 LSL で規定され, LSL が平均値  $\mu$  に近いほど, 品質レベルが高くなる。

### 3. 許容不良率 $F(x)$ , 工程能力指数 $C_{pL}$ , 信頼性指数 $R$ の関係

許容不良率や工程能力指数を扱う場合には, 特性が正規分布しているとして扱うが, 被着体の伸びや変形が小さくて接着部の凝集破壊率が高い場合には, 接着強度は正規分布になる<sup>2)</sup>。正規分布の確率密度関数  $f(x)$  は (3) 式で示され, 分布の形は図2のような左右対称となり, 全体の面積は1となる。

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} \quad (3)$$

許容不良率(以下  $F(x)$  と示す)は, 図2に示すように, 正規分布の全体の面積に対する下限側の面積の割合である。許容不良率の上限強度を  $p$  とすると, 累積密度  $F(x)$  は(4)式で表される。

$$F(x) = \int_{-\infty}^p \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} dx \quad (4)$$

(4) 式により, 平均値  $\mu$  に対する許容不良率の上限強度  $p$  の比  $p/\mu$  と標準偏差  $\sigma$  / 平均値  $\mu$  の関係を計算してプロットすると, 図3に示すように, 直線関係となり, 直線の傾

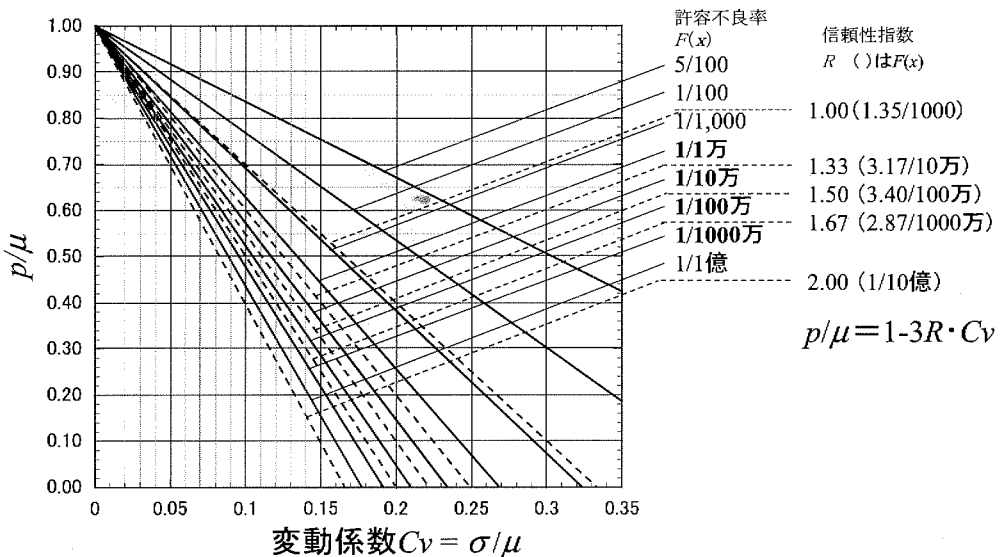


図3 変動係数  $C_v$  と許容不良率の上限強度  $p$  / 平均値  $\mu$  の関係

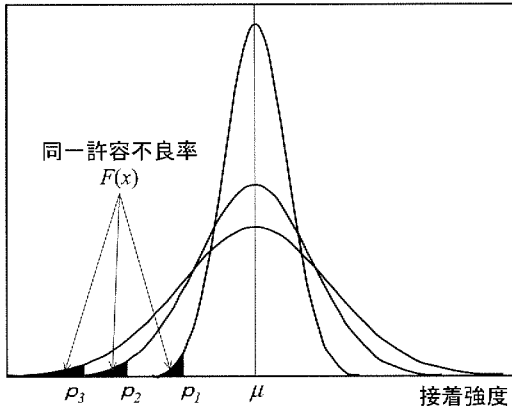


図4 同一許容不良率でのばらつき大きさによる  $p$  の変化

きは許容不良率  $F(x)$  が小さいほどきつくなる。一般に、横軸の標準偏差  $\sigma$ / 平均値  $\mu$  は変動係数  $Cv$  と呼ばれている。図4に示すように、許容不良率  $F(x)$  が同一でも、ばらつき大きさによって許容不良率の上限強度  $p$  は変化し、ばらつきが小さいほど  $p/\mu$  は高くなる。

品質管理において、部品の寸法や電気的特性のように、非破壊で全数の検査ができる場合は、工程能力指数の下側規格値  $LSL$  以下の特性の物を検査工程で排除することができるが、接着強度は非破壊での検査はできないため、下側規格値  $LSL$  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る。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、市場に流出する不合格品の割合を規定する規格値と考えるのが妥当である。即ち、図2のように、下側規格値  $LSL$  は許容不良率  $F(x)$  の上限強度  $p$  と同一で、 $LSL = p$  と考えなければならない。

工程能力指数という言葉から工程管理の手法と誤解されないように、本稿では以下、工程能力指数  $C_{pL} = (\mu - LSL)/3\sigma$  の考え方を借りて、信頼性指数  $R$  を(5)式のように定義する。

$$R = (\mu - p)/3\sigma \quad (5)$$

$\sigma =$  変動係数  $Cv \times$  平均値  $\mu$  なので、(5)式から(6)式が得られる。

$$p/\mu = 1 - 3R \times Cv \quad (6)$$

(6)式で  $R$  の値が、1.00, 1.33, 1.50, 1.67, 2.00 の場合を図3中に示した。 $R = 1.00, 1.33, 1.50, 1.67, 2.00$  は、それぞれ許容不良率  $F(x)$  で表すと 1.35/1000, 3.17/10万, 3.40/100万, 2.87/1000万, 1/10億に相当する。

ここまで示してきたことから、信頼性のレベルを表すものは、信頼性指数の  $R$  値や許容不良率  $F(x)$  であり、品質のレベル (ばらつき大きさ) を表すものは、許容不良率の上限強度  $p$  であり、 $p/\mu$  が1に近いほど品質が高い、ということがわかる。

#### 4. 高品質を満足する条件

##### 4.1 接着部に加わる外力、平均接着強度 $\mu$ と許容不良率の上限強度 $p$ の関係

接着部の外力による破壊は、接着部に加わる力の大きさと接着強度の関係で決まる。図5に示すストレス・ストレングスモデルのように、接着部に加わる力の大きさも分布しており、接着強度の分布と加わる力の分布が交わる領域で破壊不良が生じるが、接着部に加わる力の分布は明確になっていない場合も多いので、ここでは、接着部に加わる最大の力  $P_{max}$  で考え、 $P_{max}$  以下の接着強度のものが破壊すると考える。許容不良率以上の不良を出さないためには、許容不良率  $F(x)$  の上限強度  $p$  が  $P_{max}$  より高ければ良いことがわかる。また、3項で述べたように、 $p/\mu$  が大きいほど、分布はシャープとなり、品質が高くなる。

これらのことから、不良率が低く、しかもばらつきが少ない高品質を得るための条件は、 $p \geq P_{max}$  で、かつ、 $p/\mu$  が1に近いこととなる。

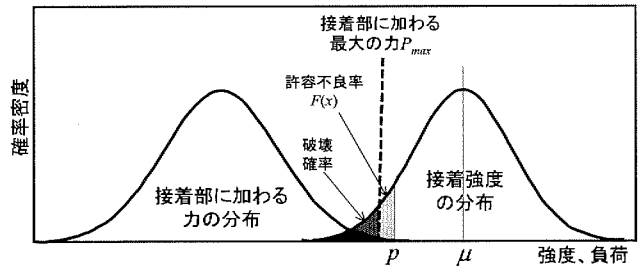


図5 ストレス・ストレングスモデルにおける接着部に加わる力と破壊確率、許容不良率  $F(x)$  の上限強度  $p$  の関係

##### 4.2 接着強度の変動係数 $Cv$

###### 4.2.1 接着強度の変動係数 $Cv$ はどのくらい必要か

品質を考える場合、多数個接着した物の中に平均強度の半分以下しか強度がないものが含まれては品質が高いとは到底言えない。平均強度の1/2以上を有していることは、最低限の品質レベルとして必要であろう。高品質と言えるためには、平均強度の70%以上は必要と思われる。これを一つの基準と考えて、図3より、 $p/\mu$  が0.50以上となる変動係数  $Cv$  を求めてみると、信頼性指数  $R$  が1.33, 1.50, 1.67の場合は、それぞれ0.125以下, 0.11以下, 0.10以下となる。同様に、 $p/\mu$  が0.70以上となるためには、変動係数  $Cv$  はそれぞれ0.075以下, 0.067以下, 0.06以下が必要となる。

###### 4.2.2 変動係数はどの程度まで小さくできるか

筆者の実績では、接着強度の変動係数  $Cv$  を、溶接やリベットなどと同等レベルの0.003まで抑えた実績があるが、 $Cv$  をここまで小さくする事は容易ではない。変動係数  $Cv$  を0.10まで小さくする事は品質確保に最低限必要であり、

接着剤や表面処理によって凝集破壊する状態まで作り込みばさほど困難ではない。さらなる諸条件の最適化による作り込みによって0.04程度まで小さくする事は可能であり, 相当な作り込みを行えば0.02程度まで小さくする事も可能である。しかし, 0.02以下にすることは非常に困難であり, ここが接着接合の品質の一つの限界といえる。この点から, 図3より,  $p/\mu$ を0.90以上にすることは事実上困難であることがわかる

### 5. 内部破壊

接着継手を設計する場合に, 破断強度を接着強度と考えて良いのであろうか。金属でも引張り試験を行うと, 弾性変形から耐力や降伏強度を超えると塑性変形に変わり, 最終的に破断するが, 破断強度が設計強度として用いられることは決してない。耐力や降伏強度, 疲労強度などを考慮してより低い強度が用いられる。現時点で, 真の接着強度を何で考えるべきかについては明確化されていないが, ここでは, 破断以前の低荷重域で生じる内部破壊で考える。

図6は, 接着継手の引張りせん断試験における伸びと荷重の関係の模式図である。最終的には破断するが, 破断以前の低荷重負荷の段階から接着部の内部では細かい破壊が始まっている。ここでは, 最初に内部破壊が始まる点を接着強度と考えることとする。

表1は, AE (Acoustic Emission) によって引張りせん断接着試験片の内部破壊を測定し, 破断荷重に対する最

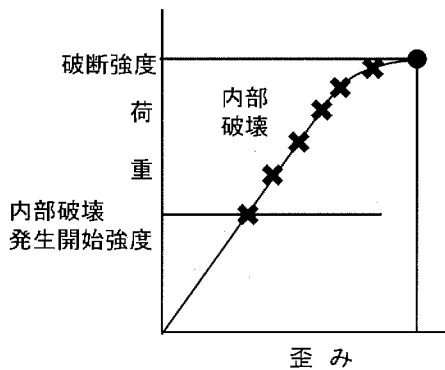


図6 接着継手の荷重-歪み線図における内部破壊の発生の模式図

表1 AE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

初のAE発生荷重の比(AE発生開始荷重比)を求めた結果である。表面処理を変えて凝集破壊する場合と界面破壊する場合について試験をしている。この結果より, 凝集破壊の場合は, 3個の試験片中最も悪い物では, 破断荷重の51%の荷重で内部破壊が始まっている。界面破壊の場合は, 3個中2個は, 破断荷重の10%以下の負荷荷重で内部破壊が始まっている。高信頼性接着の基本条件の一つとして, 凝集破壊率は40%以上必要なことをこれまで示してきた<sup>1,2)</sup>。本稿でも凝集破壊の場合を前提として話を進める。

静荷重負荷におけるAE発生開始荷重比を内部破壊係数 $h_1$ と表し, 上記の結果より, とりあえず $h_1=0.5$ とする。とりあえずと書いたのは, 内部破壊の測定はほとんどなされていないためである。今後, 多数の測定がなされ, 多くの結果が発表されてくることを期待したい。

繰返し疲労などの高サイクル疲労が加わる場合は, 疲労破壊は内部破壊の蓄積によるものと考え, 静的破断強度に対する疲労試験のS-N線図の $10^7$ 回における強度の比を内部破壊係数 $h_2$ とし, ここでは $h_2=0.25$ とする<sup>3)</sup>。なお, 高温片振り疲労ではクリープによる強度低下も加わるので,  $h_2$ はさらに低くなる場合もある。

冷熱サイクルが加わる場合は, 低サイクルの熱応力の繰返しによる破壊と考え, 静的破断強度に対する疲労試験のS-N線図の $10^4$ 回における強度の比を内部破壊係数 $h_3$ とし, ここでは $h_3=0.45$ とする<sup>3)</sup>。

### 6. 環境劣化による接着強度の低下とばらつきの増加

#### 6.1 接着強度の低下

環境劣化により, 接着強度は低下する。図7に示すように, 初期の平均強度を $\mu_0$ , 環境劣化後の平均強度を $\mu_y$ とし,  $\mu_y/\mu_0$ を劣化後の接着強度の保持率 $\eta_y$ と表す。

高品質の接着であるためには, 耐用年数経過後の保持率は, 悪くても50%以上, 望ましくは70%以上を保っていることが必要と考える。長期劣化後の保持率が50%以下まで大きく低下するような場合には, 予測できない劣化モードが混在していることも考えられ, 耐久性評価試験での寿命推定が困難となるためである。

#### 6.2 ばらつきの増加

図7に示すように, 劣化により, 接着強度のばらつきは増加する。ばらつきの増加は, 接着強度の変動係数 $Cv$ の増大として扱う。初期の変動係数を $Cv_0$ , 劣化後の変動係数を $Cv_y$ , 劣化による変動係数 $Cv$ の増大率を $k$ と表すと, (7)式となる。

$$Cv_y = k \times Cv_0 \quad (7)$$

となる。標準偏差の増加として扱わないのは, 劣化後は平均値が低下しているため, 劣化後の標準偏差が初期の標準

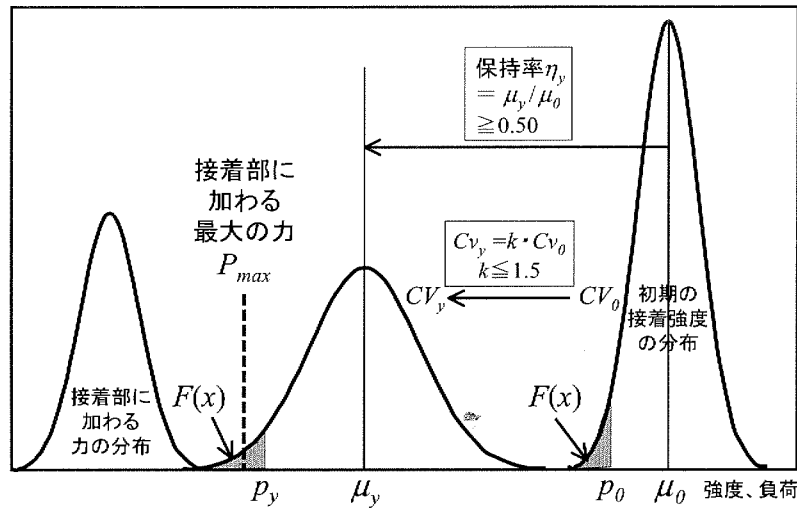


図7 劣化による接着強度の低下とばらつきの増大および許容不良率における上限強度  $p$  と接着部に加わる最大力  $P_{max}$  の関係

偏差より大きくなるとは限らないためである。

ここで、 $k$  は、筆者の多くの試験データと製品の実績から、屋外で30年間使用されるような場合でも最大で1.5と考えられ、より耐用年数が短い場合や使用環境が緩い場合は、1.2や1.4で良いと考えられる。

### 7. 初期の必要平均接着強度を求める設計式

#### 7.1 内部破壊を考慮しない場合

図7に示すように、許容不良率  $F(x)$  における初期の上限強度を  $p_0$ 、劣化後の上限強度を  $p_y$  と表す。信頼性指数  $R$  が1.67 ( $F(x) = 2.87/1000$  万に相当) で、初期の許容不良率における  $p_0$  が平均強度  $\mu_0$  の70%要求され、劣化後保持率  $\eta_y$  が50%の場合を例に、劣化後の  $p_y$  を求めてみる。まず、 $p_0/\mu_0 = 0.70$  なので、図3または(6)式から、初期の変動係数  $Cv_0$  は0.06となる。次に、劣化後の変動係数  $Cv_y$  を求める。ここでは、劣化による変動係数の増大率  $k$  を1.5とすると、(7)式より、 $Cv_y = 0.09$  となる。図3または(6)式より、 $Cv_y = 0.09$  の場合の  $p_y/\mu_y$  を求めると0.55となる。劣化後の強度保持率  $\eta_y = \mu_y/\mu_0 = 0.50$  なので、 $p_y/\mu_y = p_y/0.50\mu_0 = 0.55$  となり、 $p_y = 0.275\mu_0$  となる。劣化後においても、 $p_y$  は、接着部に加わる最大の力  $P_{max}$  より高い事が必要であるので、 $P_{max} \leq p_y = 0.275\mu_0$  から、 $\mu_0 \geq P_{max}/0.275 = 3.64 P_{max}$  となり、初期の平均強度は接着部に加わる最大の力の3.64倍以上あれば、高信頼性の接着が確保できるとなる。

これを式で表すと設計式(8)となる。

$$\mu_0/P_{max} = 1/[ \{1 - k(1 - p_0/\mu_0)\} \eta_y ] \quad (8)$$

#### 7.2 内部破壊を考慮した場合

5項で述べたように、接着の強度設計を行う場合は、破

断強度ではなく、内部破壊を考慮した強度で考える必要がある。内部破壊を考慮した接着強度は、破断強度×内部破壊係数となるので、内部破壊を考慮した初期の必要な破断強度を  $\mu_{oh}$  とすると、 $\mu_0 = \mu_{oh} \times$  内部破壊係数  $h$  となり、設計式(8)は、(9)式のように修正される。

$$\mu_{oh}/P_{max} = 1/[ h \{1 - k(1 - p_0/\mu_0)\} \eta_y ] \quad (9)$$

7.1項で求めた3.64倍以上は、内部破壊を考慮すると、静的強度のみが加わる場合には  $h_1 = 0.50$  なので7.28倍以上、高サイクル疲労が加わる場合は  $h_2 = 0.25$  なので14.56倍以上、冷熱サイクルなどの低サイクル疲労が加わる場合は  $h_3 = 0.45$  なので8.09倍以上必要となる。

#### 7.3 安全率を考慮した場合

実際の構造設計では、安全率  $S$  を見込む必要があるので、必要な初期の平均破断強度は、 $\mu_{oh} \times S$  となる。既に接着強度のばらつきや劣化、内部破壊などを考慮しているので、安全率  $S$  は、1.5~2.0倍で良いと考えられる。安全率  $S$  と内部破壊を考慮した初期の平均破断強度を  $\mu_{ohs}$  とすると、設計式(9)は、(10)式のように修正される。

$$\mu_{ohs}/P_{max} = S/[ h \{1 - k(1 - p_0/\mu_0)\} \eta_y ] \quad (10)$$

安全率  $S$  を1.5とすると、7.2で求めた必要倍率は、静的強度のみが加わる場合には10.92倍以上、高サイクル疲労が加わる場合は21.84倍以上、冷熱サイクルなどの低サイクル疲労が加わる場合は12.14倍以上となる。

### 8. まとめ

不良率が低く、接着強度のばらつきも小さい高品質な接着部を簡易に設計するための「 $Cv$  設計法」について述べた。まとめると以下ようになる。

(1) 不良率を低下させるためには、許容不良率  $F(x)$  をで

きるだけ低く設定する。あるいは, 信頼性指数  $R$  値をできるだけ高く設定する。

- (2) 強度ばらつきを小さくして品質を高くするためには,  $p/\mu$  ( $\mu$ : 平均値,  $p$ : 許容不良率  $F(x)$  における上限強度) をできるだけ高くする。
- (3) 必要な変動係数  $C_v$  は,  $C_v \leq (1-p/\mu)/3R$  で求められる。
- (4) 接着部の強度設計を行うには, 破断強度ではなく, 内部破壊開始強度で考える必要がある。
- (5) 内部破壊, 劣化 (強度低下とばらつき増大), 安全率を考慮した初期の接着部の平均破断強度  $\mu_{0hs}$  が接着部に加わる最大の力  $P_{max}$  の何倍あれば良いかを求める設計式は次の通りである。

$$\mu_{0hs}/P_{max} = S/[h\{1-k(1-p_0/\mu_0)\}\eta_y]$$

ここで, 安全率  $S$  は 1.5~2.0 程度, 内部破壊係数  $h$  は, 静的負荷力だけが加わる場合は  $h_1=0.50$ , 高サイクル疲労が加わる場合は  $h_2=0.25$ , 冷熱サイクルなどの低サイクル疲労が加わる場合は  $h_3=0.45$  程度, 劣化による変動係数  $C_v$  の増大率  $k$  は 1.5 以下,  $p_0/\mu_0$  は 0.5 以上, 劣化後の強度保持率  $\eta_y$  は 0.50 以上である。

- (6) 高信頼性接着の基本は, 凝集破壊率を高くする作り込みを行い, 変動係数  $C_v$  を小さくする事である。

## 文 献

- 1) 原賀康介, 接着の技術誌, 32(3), 62 (2012).
- 2) 原賀康介, 日本接着学会誌, 50, 101 (2014).
- 3) 原賀康介, 日本接着学会誌, 50, 53 (2014).