

<総説>

(受理：2020年5月13日)

接着接合部の信頼性解析技術

鈴木 靖昭*

要 旨

接着接合部の信頼性すなわち接合部が正常に機能する確率は、温度、湿度、応力、太陽光、風雨などのストレスに対する耐久性の大きさ、接合強度およびばらつきの大きさ、ならびに接合系の冗長性すなわちスポット溶接、リベット止めなど他の接合法の併用の有無などにより影響を受ける。

ここでは、ストレス-強度モデルに基づいて、一定時間使用後の接着接合部の故障確率ならびに所定の故障確率の確保のために必要な安全率（接合部の強度平均値/負荷応力平均値）の値を、標準正規分布関数（NORMSDIST）およびその逆関数（NORMSINV）のEXCEL計算シートを用いて、速やかに計算する方法について解説する。

1. はじめに

接着接合部の信頼性 (reliability) とは、接着接合部が正常に機能する確率であり、接合部の信頼性に影響を与える次に示す因子について検討する必要がある。

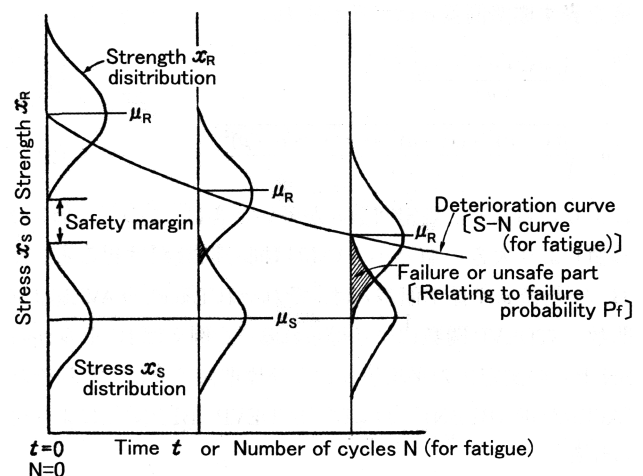
- ① 温度、湿度、(繰返しを含む) 応力、光、水分、薬品、などに対する耐久性 (durability) すなわち劣化速度
- ② 接合強度およびそのばらつきの程度と持続性
- ③ スポット溶接やリベット留めなど他の接合法の併用などの接合系の冗長性

そこで本総説では、一定時間使用後の接着接合部の故障確率および所定の故障確率の確保のために必要な安全率（接合部の強度平均値/応力平均値）の計算について Microsoft Office Excel® (以降、Excel) の標準正規分布に関する Excel 関数を用いた計算法について述べる。

なお、次回には接合部の耐久性に関する加速試験と寿命予測法について紹介する。

2. 経年劣化による故障発生のメカニズム (ストレス-強度モデル)

接着当初には十分な接着強度があっても、屋外暴露 (風雨・太陽光)、振動などの使用環境や部材に作用する応力 (繰返しを含む) によって接合部に経年劣化が生じ、トラ

Fig. 1 Stress-Strength model¹⁾.

鈴木 靖昭



経歴：鈴木接着技術研究所 所長，略歴：1965年名古屋工業大学工業化学科卒業。同年日本車輛製造株式会社入社。技術研究所～開発本部に所属。高圧発電機絶縁用エポキシ樹脂の開発，FRP・CFRPの応用研究，有機材料の故障解析，鉄道車両用接着継手の強度・破壊条件・信頼性・耐久性に関する研究等に従事。名城大学および中部大学非常勤講師を経て，(公財)名古屋産業振興公社等の技術アドバイザーを務める。工学博士（名古屋大学），日本接着学会功績賞受賞（2020年）

趣味：音楽鑑賞

*鈴木接着技術研究所
愛知県一宮市千秋町浮野字屋敷 131 〒491-0806

ブルが発生する。Fig. 1 に示すようにストレス（使用応力・設計応力）分布曲線と材料（接着継手）の強度分布曲線が、初期においては重なりを持たなくても、経年劣化により強度が下がり（平均値 μ の減少）、ばらつきも大きくなる（標準偏差 σ の増加）とともに曲線が重なるようになり、破壊が起こる¹⁾。したがって、接着継手は実使用条件と同様な湿潤・応力負荷条件下の耐久性試験、促進耐候性試験、疲労試験などの促進試験を行って、経年劣化による強度分布を確認しておくことが重要である。Fig. 1 の重なる部分の面積に対応する破壊確率 P_f の計算法を次節で述べる。

3. 所定年数使用後の接着接合部に要求される故障確率確保のために必要な安全率の計算法^{5~7)}

3.1 正規分布について^{2,3)}

正規分布は、偶然が原因の積み重ねによって生じる事象の多くが従う分布とされ、多くの部品からなるアイテムの故障分布や材料強度の安全率（安全係数）の検討などに応用できる。

ある未知の量 x を n 回測定し、測定値 x_1, x_2, \dots, x_n を得た時、相加平均 μ （以降、平均値）やそのばらつきの程度を表す標準偏差 σ は、それぞれ、

$$\mu = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \mu)^2 + (x_2 - \mu)^2 + \dots + (x_n - \mu)^2}{n}} \quad (2)$$

により得られる。測定回数 n が多いときは、この平均値（最確値）より大きい値と小さい値は同じ回数だけ起こる。なお、平均値 μ や標準偏差 σ は、それぞれ Excel の AVERAGE 関数、STDEVP 関数により得られる⁸⁾。例えば B1 セルから BN セルの測定値の平均値 μ および標準偏差 σ は、それぞれ“AVERAGE (B1:BN)” および “STDEVP (B1:BN)” により得られる⁸⁾。

正規分布においては、測定値 x が得られる確率密度関数 $f(x)$ および故障確率関数 $F(x)$ は、次式によって表される。

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

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

また、式 (3) および式 (4) に示したように、両関数は Excel の NORMDIST 関数⁸⁾（正規分布：Normal Distribution）により計算できる。Fig. 2 に示すように、確率密度関数 $f(x)$ は確率変数 $x = \mu$ に関して対称な釣形鐘形の曲線となり、故障確率関数 $F(x)$ は斜線部分の面積である。

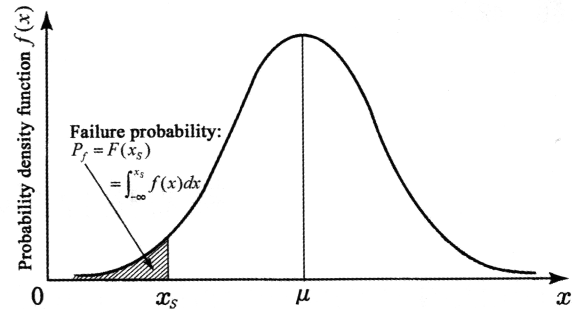


Fig. 2 Relationship between probability density function $f(x)$ and failure probability function $F(x)$ ^{2,3)}.

なお、正規分布に従う確率変数 x を

$$t = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (5)$$

という変数 t への変換により、平均値 $\mu = 0$ 、標準偏差 $\sigma = 1$ の標準正規分布に変換できる。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) = \phi(t) \\ = \text{NORMDIST}(t, 0, 1, \text{FALSE}) \quad (6)$$

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = \Phi(t) \\ = \text{NORMDIST}(t, 0, 1, \text{TRUE}) \\ = \text{NORMSDIST}(t) \quad (7)$$

ここで、 $\phi(t)$ は標準正規密度関数、 $\Phi(t)$ は標準正規分布関数と呼ばれる³⁾。なお、前記式のように、両関数は Excel の NORMDIST 関数によって計算できるとともに、 $\Phi(t)$ は、前記式 (7) のように、NORMSDIST 関数（Normal Standard Distribution の意）によっても計算できる^{5~7)}。

なお、通常、書籍に標準正規分布表として掲示されているのは、後出 3.3 項 Fig. 7 に示す $t \geq 0$ における $1 - \Phi(t) = 1 - \text{NORMSDIST}(t)$ の値である^{1,3,4)}。

3.2 ストレス（応力）が一定の場合の接着継手の故障確率の確保のために必要な安全率の決定^{5~7)}

Fig. 2 において強さの平均値 μ を許容応力とし、設計応力（作用するストレス） x_s を一定と仮定すると、安全率（安全係数） S_c は

$$S_c = \mu / x_s \quad (8)$$

となり、このときの故障確率 P_f は、Fig. 2 より、

$$P_f = F(x_s) = \int_{-\infty}^{x_s} f(x) dx \\ = \text{NORMDIST}(x_s, \mu, \sigma, \text{TRUE}) \quad (9)$$

となる。このように、許容応力 μ に等しく設計応力 x_s をとつ

た(安全率 $S_c=1$) 場合, 使用に供される部品の 50% は破壊しないが, 残りの 50% は破壊することになり²⁾, 不都合である。そこで, Fig. 2 において, x_s を小さく(安全率 S_c を 1 より大きく) 取れば, 式 (9) の故障確率 P_f が小さくなる。また, Fig. 3³⁾ に示すように, 強さのばらつき, すなわち標準偏差 σ の値が大きくなり, $f(x)$ 曲線のピークがブロードになれば, 同一の μ および x_s すなわち同一の安全率でも, 故障確率 P_f は大きくなることが分かる。

したがって, 一定の故障確率を確保するためには, ばらつきの大きい材料ほど安全率を大きく取る必要がある。なお強度のばらつきは, 静的, 繰返し, 衝撃など, 外力の種類に依存するため注意が必要である。

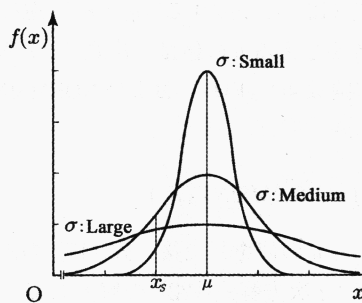


Fig. 3 Relationship between probability density function $f(x)$ and standard deviation σ ³⁾.

x_s を式 (5) により変数 t_s へ変換すれば, 安全率 S_c との関係は,

$$t_s = \frac{x_s - \mu}{\sigma} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\mu}{S_c} - \mu \right) = \frac{\mu}{\sigma} \left(\frac{1}{S_c} - 1 \right) = \frac{1}{\eta} \left(\frac{1}{S_c} - 1 \right) \quad (10)$$

で表される。ここで, η は接着強度のばらつきの程度を示す変動係数であり, 前記 Excel 関数を用いても得られる。

$$\eta = \frac{\text{標準偏差}}{\text{平均値}} = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{STDEV(B1:BN)}{AVERAGE(B1:BN)} \quad (11)$$

したがって, 故障確率 P_f は, 式 (7) および式 (10) により,

$$P_f = F(t_s) = \Phi(t_s) = \Phi \left[\frac{1}{\eta} \left(\frac{1}{S_c} - 1 \right) \right] = \text{NORMSDIST}(t_s) \quad (12)$$

式 (12) に任意の安全率 S_c の値を代入すれば対応する故障確率 P_f の値が得られるため, $S_c - P_f$ 曲線群を描くことができる。また式 (12) は, 3.3 項の式 (20) において, ストレスの変動係数 $\eta_s = 0$ とおいて得られる式と一致する。

一方, 必要とする故障確率 P_f を与える S_c の値は, 逆標準正規分布関数 $\Phi^{-1}(P_f)$ すなわち Excel の NORMSINV(P_f) 関数 (Normal Standard Inverse の意) を用いて, 3.3 項の式 (24) により得られる⁸⁾。Fig. 4 および Table 3 (後出, ストレスが分布する場合の計算結果と併記) には, 接着強度の変動係数 $\eta_R = 0.05 \sim 0.3$ の場合の安全率 S_c の計算結果を示す。なお, Fig. 4 の計算結果については, 次項で述べる。

3.3 ストレス (応力) が変動する場合の接着接合部の故障確率の確保のために必要な安全率の決定法^{5~7)}

Fig. 5 に示すようにストレスおよび強度がともに分布する場合⁴⁾, 接着継手の強度を x_R , 作用するストレスを x_s とすれば, 継手の故障確率 P_f は次式で表される (P_f : 確率)³⁾。

$$P_f = P_r[x_R \leq x_s] \quad (13)$$

ここで, 強度 x_R が正規分布 $N(\mu_R, \sigma_R^2)$, ストレス x_s が正規分布 $N(\mu_s, \sigma_s^2)$ に従うならば, $x = x_R - x_s$ は正規分布 $N(\mu_R - \mu_s, \sigma_R^2 + \sigma_s^2)$ に従う^{3, 4, 9)} [平均値 $\mu = \mu_R - \mu_s$, 標準偏差 $\sigma = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}$]。

したがって, その確率密度関数 $f(x)$ は, 式 (3) より,

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_R^2 + \sigma_s^2)}} \exp \left[-\frac{\{x - (\mu_R - \mu_s)\}^2}{2(\sigma_R^2 + \sigma_s^2)} \right] \quad (14)$$

となり^{3, 4)}, これを Fig. 6 に示す。

Fig. 5 の両曲線の重なり部分に対応する故障確率 P_f は, Fig. 6 の $x \leq 0$ の範囲の曲線下の面積に等しい。

ここで,

$$t = \frac{x - \mu}{\sigma} = \frac{x - (\mu_R - \mu_s)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}}, \quad dx = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2} dt \quad (15)$$

とおいて 変数変換して, 式 (14) を標準化すると, 故障確率 P_f を与える次式が得られる [平均値 $\mu = 0$, 標準偏差

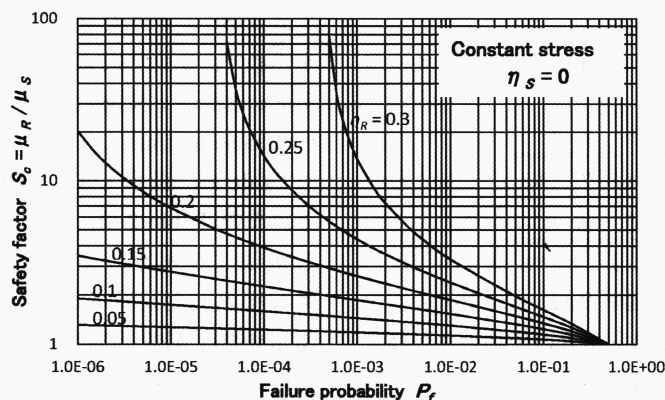
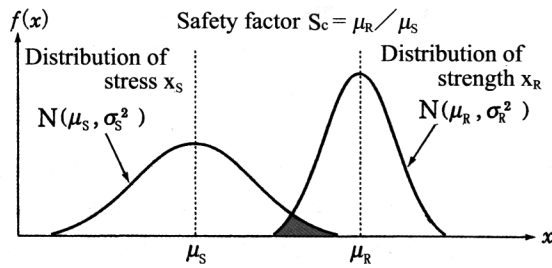
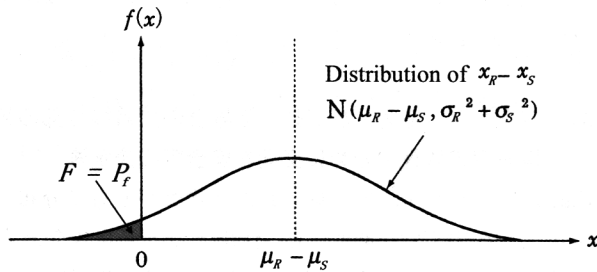


Fig. 4 Relationship between safety factor S_c and failure probability P_f in the case of constant stress^{5~7)}.

Fig. 5 Distributions of stress x_s and strength x_R ⁴⁾.Fig. 6 Distribution of $x_R - x_s$ ⁴⁾.

$\sigma=1$, 確率変数 t]^{3,4)}.

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt = \Phi(u) = \text{NORMSDIST}(u) \quad (16)$$

ただし, u は $x=0$ における t の値であり, 次式 (17) で表される。

$$u = -\frac{\mu_R - \mu_s}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}} = -\frac{S_c - 1}{\sqrt{S_c^2 \eta_R^2 + \eta_s^2}} \quad (\leq 0) \quad (17)$$

ストレスが一定の場合, 式 (17) において $\eta_s=0$, $\eta_R=\eta$ とおけば, u は 3.2 項の式 (10) の t_s に一致する。

式 (17) において, S_c は中央安全率 (中央安全係数) すなわち, 強度 x_R の平均値 μ_R とストレス x_s の平均値 μ_s の比,

$$S_c = \frac{\mu_R}{\mu_s} \quad (18)$$

であり, η_R と η_s は次式 (19) で定義した強度とストレスの変動係数である。

$$\eta_R = \frac{\sigma_R}{\mu_R}, \quad \eta_s = \frac{\sigma_s}{\mu_s} \quad (19)$$

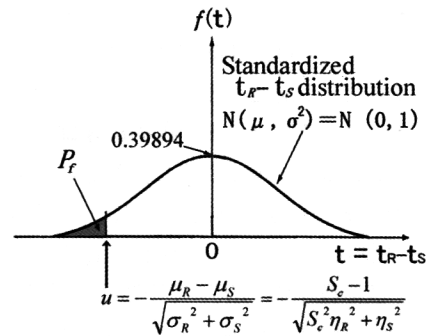
式 (17) ~ 式 (19) を用いれば, 式 (16) は次のようになる^{3,4~7)}。

$$\begin{aligned} P_f &= \Phi(u) = \Phi\left(-\frac{\mu_R - \mu_s}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_s^2}}\right) = \Phi\left(-\frac{S_c - 1}{\sqrt{S_c^2 \eta_R^2 + \eta_s^2}}\right) \\ &= \text{NORMSDIST}(u) = \text{NORMSDIST}\left(-\frac{S_c - 1}{\sqrt{S_c^2 \eta_R^2 + \eta_s^2}}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

したがって, 接着継手の故障確率 P_f は, 式 (18) の安全率および式 (19) の接着強度とストレスの変動係数が与えられれば式 (20) により一義的に決まる。

Fig. 7 には, 式 (16) ~ 式 (20) の P_f 計算法を示した。

なお, 対数正規分布においても真数でなく対数値を用い

Fig. 7 Method to calculate failure probability P_f from standardized $t_R - t_s$ distribution.

れば, 同じ扱いで故障確率を求めることができる³⁾。

また, 式 (20) は, $\eta_s=0$ とおけば 3.2 項のストレス = 一定の場合の式 (12) と一致する ($\eta_R=\eta$)。逆に, 必要とする故障確率 P_f を与える u の値は, 次式 (21) のように, 逆標準正規分布関数 $\Phi^{-1}[F(t)]$ および NORMSINV 関数により得られる⁸⁾。

$$u = \Phi^{-1}(P_f) = \text{NORMSINV}(P_f) \quad (21)$$

このようにして u の値を得た後, 式 (17) の両辺を二乗して整理すれば, 2 次方程式 (22) の解として, 故障確率 P_f を与える安全率 S_c の値が式 (23) により一義的に得られる。

$$(1 - u^2 \eta_R^2) S_c^2 - 2 S_c + 1 - u^2 \eta_s^2 = 0 \quad (22)$$

$$S_c = \frac{1 + \sqrt{1 - (1 - u^2 \eta_R^2)(1 - u^2 \eta_s^2)}}{1 - u^2 \eta_R^2} \quad (23)$$

式 (23) において, $\eta_s=0$ (ストレスの変動なし) とおけば, 3.3 項におけるストレス (応力) = 一定の場合に必要な故障確率 P_f を与える安全率 S_c の計算式として, 次式が得られる ($P_f \leq 0.5$ において, $u \leq 0$ であり大きい方の解を採用)。

$$S_c = \frac{1 - u \eta_R}{1 - u^2 \eta_R^2} = \frac{1}{1 + u \eta_R} \quad (24)$$

Table 1 は, 接着強度およびストレスに関する平均値 μ_R および μ_s , 変動係数 η_R および η_s の値を入力し, C 列で式 (18) により安全率 S_c , F 列で式 (17) により u の値を求めて, G 列で式 (20) により故障確率 P_f の値を計算する Excel シートである (参考: <http://www.s-adhesion-tech.com/kaisetu.html>)。

Table 1 に表示している計算結果については後述する。また Table 2 は, 接着強度およびストレスの変動係数 η_R および η_s が与えられた時, 確保すべき A 列の故障確率 P_f に対応する u の値を, B 列において式 (21) の NORMSINV 関数 (逆標準正規分布関数) により計算し, E 列において式 (23) を用い, 必要な安全率 S_c の値を計算する Excel シートである (参考: <http://www.s-adhesion-tech.com/kaisetu.html>)。

Table 1 Excel calculation sheet of failure probability P_f using NORMSDIST function.

G2		F2		F2		F2		F2	
A	B	C	D	E	F	G	H		
μ_R	μ_S	$S_c = \mu_R / \mu_S$	η_R	η_S	$u = -\frac{S_c - 1}{\sqrt{S_c^2 \eta_R^2 + \eta_S^2}}$	$P_f = \text{NORMSDIST}(u)$	Remarks		
3	1	3	0.2	0	-3.3333	4.2906E-04	Constant stress $\eta_S=0$ (Fig.4)		
5	1	5	0.16711	0.1	-4.7533	1.0004E-06	Right downward dashed arrow in Fig.8		
4	1	4	0.17407	0.1	-4.2649	1.0002E-05			
3.1	1	3.1	0.17928	0.1	-3.7188	1.0007E-04			
2.6	1	2.6	0.19539	0.1	-3.0902	1.0000E-03			
2	1	2	0.1	0.3	-2.7735	2.7728E-03	Fi.11 & Fig.12		
2	1	2	0.2	0.3	-2.0000	2.2750E-02			
2	1	2	0.3	0.3	-1.4907	6.8019E-02			
3.5	1	3.5	0.1	0.3	-5.4233	2.9261E-08	Fi.13 & Fig.14		
3.5	1	3.5	0.2	0.3	-3.2827	5.1416E-04			
3.5	1	3.5	0.3	0.3	-2.2893	1.1030E-02			
Note 1. First line is comment line									
Note 2. $u = F = -(C-1)/\text{SQRT}(C^2 \eta_R^2 + \eta_S^2)$									
Note 3. Please use this calculation sheet at your own risk.									

Table 2 Excel calculation sheet of safety factor S_c using NORMSINV function.

E2		F2		F2		F2		F2	
A	B	C	D	E	F	G			
P_f	$u = B = \Phi^{-1}(P_f) = \text{NORMSINV}(P_f)$	η_R	η_S	S_c	Remarks				
1.00E-03	-3.0902	0.1	0	1.45	Constant stress ($\eta_S=0$) (Table 3 left side)				
1.00E-04	-3.7190	0.1	0.1	1.75	$\eta_R=0.1, \eta_S=0.1$ (Table 3 right side)				
1.00E-03	-3.0902	0.1	0.1	1.58					
1.00E-04	-3.7190	0.1	0.2	2.07	$\eta_R=0.1, \eta_S=0.2$ (Table 4 left side)				
1.00E-03	-3.0902	0.1	0.2	1.84					
1.00E-05	-4.2649	0.1	0.3	2.73	$\eta_R=0.1, \eta_S=0.3$ (Table 4 right side)				
1.00E-04	-3.7190	0.1	0.3	2.44					
1.00E-03	-3.0902	0.1	0.3	2.14					
1.00E-06	-4.7534	0.2	0.3	21.29	$\eta_R=0.2, \eta_S=0.3$ (Table 4 right side)				
1.00E-05	-4.2649	0.2	0.3	7.65					
1.00E-04	-3.7190	0.2	0.3	4.60					
P_f	u	η_R^*	η_S	S_c	* Value of η_R required for $P_f = 10^{-6}$ and $S_c = 3.5$				
1.00E-06	-4.7534	0.150	0	3.48	$\eta_S=0$ (Fig.4)				
1.00E-06	-4.7534	0.148	0.1	3.53	$\eta_S=0.1$ (Fig.8)				
1.00E-06	-4.7534	0.139	0.2	3.50	$\eta_S=0.2$ (Fig.9)				
1.00E-06	-4.7534	0.123	0.3	3.49	$\eta_S=0.3$ (Fig.10)				
P_f	u	$\eta_R^{\#}$	η_S	S_c	# Value of η_R required for $P_f = 10^{-5}$ and $S_c = 3.5$				
1.00E-05	-4.2649	0.167	0	3.48	$\eta_S=0$ (Fig.4)				
1.00E-05	-4.2649	0.165	0.1	3.50	$\eta_S=0.1$ (Fig.8)				
1.00E-05	-4.2649	0.157	0.2	3.48	$\eta_S=0.2$ (Fig.9)				
1.00E-05	-4.2649	0.144	0.3	3.50	$\eta_S=0.3$ (Fig.10)				
P_f	u	$\eta_R^{\%}$	η_S	S_c	% Value of η_R required for $P_f = 10^{-4}$ and $S_c = 3.5$				
1.00E-04	-3.7190	0.192	0	3.50	$\eta_S=0$ (Fig.4)				
1.00E-04	-3.7190	0.190	0.1	3.50	$\eta_S=0.1$ (Fig.8)				
1.00E-04	-3.7190	0.183	0.2	3.49	$\eta_S=0.2$ (Fig.9)				
1.00E-04	-3.7190	0.172	0.3	3.50	$\eta_S=0.3$ (Fig.10)				
Note 1. First line is comment line									
Note 2. $S_c = E = \frac{1 + \sqrt{1 - (1 - u^2 \eta_R^2)(1 - u^2 \eta_S^2)}}{1 - u^2 \eta_R^2}$									
Note 3. Please use this calculation sheet at your own risk.									

Table 3, Table 4, Fig. 4 (前出), および Fig. 8 ~ Fig. 10 には, ストレス一定 ($\eta_S=0$) およびストレスの変動係数 η_S の値が, 0.1, 0.2, および 0.3 の各場合について, 強度の変動係数 η_R の値を, 0.05, 0.1, 0.2, 0.25, および 0.3 と変化させた場合の安全率 S_c の計算結果を示す。

図示していないが, $\eta_S=0.05$ の場合の計算結果は, Fig. 4 のストレスが一定の場合とほぼ同一であった。

なお, いずれの場合も, $\mu_R - \mu_S = 0$, すなわち強度の平

均値とストレスの平均値が等しい (安全率 $S_c=1$) の場合は, 式 (20) において, $\Phi(0)=0.5$ であるため, 故障確率 $P_f=0.5$ (50%) となることは 3.3 項のストレスが一定の場合と同じである (Fig. 7 も参照)。

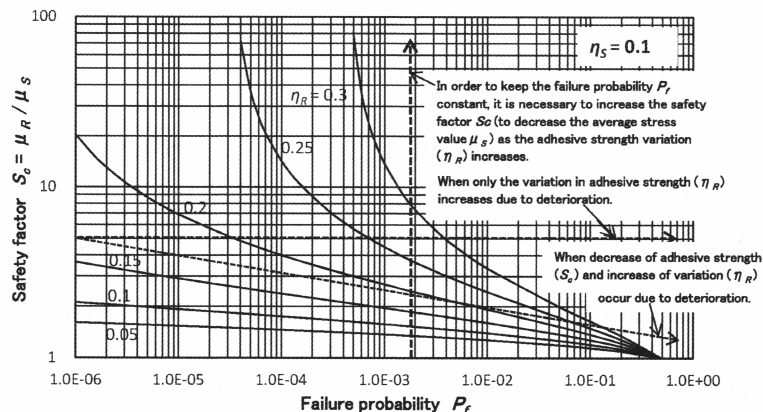
Fig. 4 および Fig. 8 ~ Fig. 10 の計算結果を比較すると, ストレスが一定の場合および変化する場合も, すなわちストレスの変動係数 η_S が変わっても, 強度の変動係数 η_R が同じならば, 同一故障確率 P_f を与える安全率 S_c の値には

Table 3 Relationship between safety factor S_c and failure probability P_f in the case of constant stress and $\eta_s = 0.1^{5 \sim 7)}$.

Constant stress $\eta_s=0$							Coefficient of variation of stress $\eta_s=0.1$						
Failure probability P_f	Coefficient of variation of strength η_R						Failure probability P_f	Coefficient of variation of strength η_R					
	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3		0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
	Safety factor $S_0 (= \mu_R / \mu_S)$							Safety factor $S_0 (= \mu_R / \mu_S)$					
1.0E-06	1.31	1.91	3.48	20.28			1.0E-06	1.61	2.11	3.64	20.40		
1.5E-06	1.30	1.88	3.34	15.19			1.5E-06	1.60	2.08	3.49	15.31		
2.0E-06	1.30	1.86	3.24	12.87			2.0E-06	1.59	2.05	3.39	12.98		
3.0E-06	1.29	1.83	3.11	10.56			3.0E-06	1.58	2.02	3.26	10.67		
5.0E-06	1.28	1.79	2.96	8.58			5.0E-06	1.56	1.98	3.10	8.69		
7.0E-06	1.28	1.77	2.87	7.62			7.0E-06	1.55	1.95	3.01	7.73		
1.0E-05	1.27	1.74	2.78	6.80			1.0E-05	1.54	1.93	2.91	6.91		
3.0E-05	1.25	1.67	2.51	5.06			3.0E-05	1.50	1.84	2.64	5.16		
4.0E-05	1.25	1.65	2.45	4.74	71.94		4.0E-05	1.49	1.82	2.57	4.83	72.02	
5.0E-05	1.24	1.64	2.40	4.51	36.56		5.0E-05	1.48	1.80	2.52	4.60	36.64	
6.0E-05	1.24	1.62	2.36	4.33	26.00		6.0E-05	1.48	1.79	2.48	4.43	26.07	
7.0E-05	1.24	1.62	2.33	4.20	20.85		7.0E-05	1.47	1.78	2.45	4.29	20.93	
1.0E-04	1.23	1.59	2.26	3.90	14.24		1.0E-04	1.46	1.75	2.38	3.99	14.31	
1.5E-04	1.22	1.57	2.18	3.61	10.40		1.5E-04	1.45	1.72	2.30	3.70	10.47	
3.0E-04	1.21	1.52	2.06	3.19	7.04		3.0E-04	1.42	1.67	2.17	3.27	7.11	
5.0E-04	1.20	1.49	1.97	2.92	5.64	77.87	5.0E-04	1.40	1.63	2.08	3.00	5.70	77.92
6.0E-04	1.19	1.48	1.94	2.84	5.26	35.29	6.0E-04	1.39	1.62	2.04	2.92	5.32	35.34
7.0E-04	1.19	1.47	1.92	2.77	4.97	24.04	7.0E-04	1.39	1.60	2.02	2.85	5.03	24.09
8.0E-04	1.19	1.46	1.90	2.71	4.74	18.79	8.0E-04	1.38	1.59	2.00	2.79	4.80	18.84
1.0E-03	1.18	1.45	1.86	2.62	4.40	13.71	1.0E-03	1.38	1.58	1.96	2.69	4.46	13.76
1.5E-03	1.17	1.42	1.80	2.46	3.87	9.12	1.5E-03	1.36	1.55	1.89	2.53	3.93	9.17
2.0E-03	1.17	1.40	1.76	2.36	3.57	7.32	2.0E-03	1.35	1.52	1.85	2.43	3.62	7.37
3.5E-03	1.16	1.37	1.68	2.17	3.07	5.24	3.5E-03	1.32	1.48	1.76	2.24	3.12	5.28
5.0E-03	1.15	1.35	1.63	2.06	2.81	4.40	5.0E-03	1.31	1.45	1.71	2.12	2.86	4.44
1.0E-02	1.13	1.30	1.54	1.87	2.39	3.31	1.0E-02	1.28	1.40	1.61	1.93	2.44	3.35
5.0E-02	1.09	1.20	1.33	1.49	1.70	1.97	5.0E-02	1.19	1.27	1.38	1.53	1.73	2.00
1.0E-01	1.07	1.15	1.24	1.34	1.47	1.62	1.0E-01	1.15	1.20	1.28	1.38	1.50	1.65
2.0E-01	1.04	1.09	1.14	1.20	1.27	1.34	2.0E-01	1.10	1.13	1.17	1.22	1.28	1.35
5.0E-01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	5.0E-01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Table 4 Relationship between safety factor S_c and failure probability P_f in the case of stress distributing ($\eta_s = 0.2$ and 0.3)^{5~7)}.

Coefficient of variation of stress $\eta_s=0.2$							Coefficient of variation of stress $\eta_s=0.3$						
Failure probability P_f	Coefficient of variation of strength η_R						Failure probability P_f	Coefficient of variation of strength η_R					
	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3		0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
	Safety factor $S_c = \mu_R / \mu_s$							Safety factor $S_c = \mu_R / \mu_s$					
1.0E-06	2.07	2.53	4.02	20.74			1.0E-06	2.55	3.03	4.53	21.29		
1.5E-06	2.05	2.49	3.86	15.64			1.5E-06	2.52	2.97	4.36	16.17		
2.0E-06	2.03	2.46	3.76	13.31			2.0E-06	2.50	2.94	4.25	13.83		
3.0E-06	2.01	2.42	3.62	10.99			3.0E-06	2.47	2.88	4.09	11.49		
5.0E-06	1.99	2.37	3.45	9.00			5.0E-06	2.43	2.82	3.91	9.47		
7.0E-06	1.97	2.34	3.35	8.03			7.0E-06	2.40	2.78	3.80	8.49		
1.0E-05	1.95	2.30	3.24	7.20			1.0E-05	2.38	2.73	3.68	7.65		
3.0E-05	1.89	2.19	2.95	5.44			3.0E-05	2.29	2.59	3.35	5.84		
4.0E-05	1.87	2.16	2.88	5.10	72.26		4.0E-05	2.26	2.55	3.27	5.49	72.65	
5.0E-05	1.86	2.14	2.82	4.86	36.87		5.0E-05	2.25	2.53	3.20	5.24	37.25	
6.0E-05	1.85	2.12	2.78	4.69	26.30		6.0E-05	2.23	2.50	3.16	5.06	26.67	
7.0E-05	1.84	2.11	2.74	4.54	21.15		7.0E-05	2.22	2.48	3.11	4.91	21.52	
1.0E-04	1.82	2.07	2.66	4.24	14.53		1.0E-04	2.19	2.44	3.02	4.60	14.88	
1.5E-04	1.79	2.03	2.57	3.94	10.68		1.5E-04	2.15	2.39	2.92	4.28	11.01	
3.0E-04	1.75	1.96	2.42	3.49	7.30		3.0E-04	2.09	2.30	2.75	3.81	7.61	
5.0E-04	1.72	1.91	2.32	3.22	5.89	78.09	5.0E-04	2.04	2.23	2.63	3.52	6.17	78.36
6.0E-04	1.70	1.89	2.29	3.13	5.50	35.51	6.0E-04	2.03	2.21	2.59	3.42	5.78	35.77
7.0E-04	1.69	1.88	2.26	3.05	5.21	24.25	7.0E-04	2.01	2.19	2.55	3.34	5.48	24.51
8.0E-04	1.68	1.86	2.23	2.99	4.98	19.00	8.0E-04	2.00	2.17	2.52	3.27	5.25	19.25
1.0E-03	1.67	1.84	2.19	2.89	4.63	13.91	1.0E-03	1.98	2.14	2.48	3.16	4.89	14.16
1.5E-03	1.64	1.80	2.11	2.72	4.10	9.31	1.5E-03	1.94	2.08	2.39	2.98	4.34	9.54
2.0E-03	1.62	1.77	2.06	2.61	3.78	7.51	2.0E-03	1.91	2.04	2.32	2.86	4.02	7.73
3.5E-03	1.58	1.71	1.96	2.40	3.27	5.41	3.5E-03	1.85	1.97	2.20	2.64	3.49	5.61
5.0E-03	1.55	1.67	1.90	2.28	3.00	4.57	5.0E-03	1.81	1.92	2.13	2.50	3.20	4.75
1.0E-02	1.50	1.60	1.77	2.07	2.56	3.46	1.0E-02	1.73	1.82	1.98	2.26	2.74	3.62
5.0E-02	1.35	1.40	1.49	1.63	1.82	2.08	5.0E-02	1.51	1.56	1.64	1.76	1.94	2.19
1.0E-01	1.27	1.31	1.37	1.45	1.56	1.70	1.0E-01	1.39	1.43	1.48	1.55	1.65	1.79
2.0E-01	1.18	1.20	1.23	1.27	1.33	1.39	2.0E-01	1.26	1.27	1.30	1.34	1.39	1.44
5.0E-01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	5.0E-01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

**Fig. 8** Relationship between safety factor S_c and failure probability P_f in the case of stress distributing ($\eta_s = 0.1$)^{5~7)}.

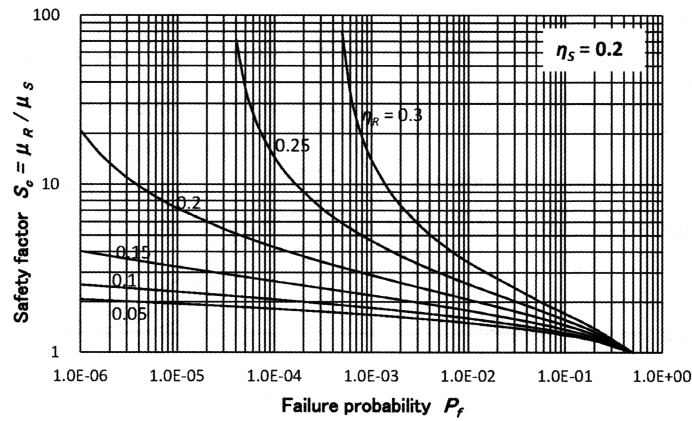


Fig. 9 Relationship between safety factor S_c and failure probability P_f in the case of stress distributing ($\eta_s = 0.2$)^{5~7)}.

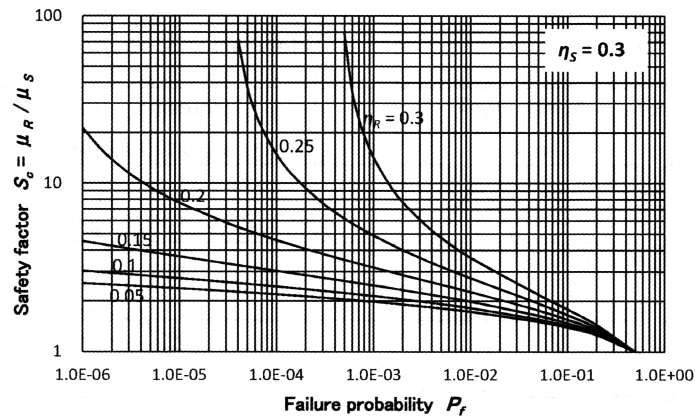


Fig. 10 Relationship between safety factor S_c and failure probability P_f in the case of stress distributing ($\eta_s = 0.3$)^{5~7)}.

大きな差が見られない。

しかし、Fig. 8 に示すように、故障確率 P_f を一定とするためには、接着強度のばらつきが大きい、すなわち変動率 η_R が大きい場合ほど安全率 S_c の値を大きく取る、すなわちストレスを小さくする必要がある。Fig. 8 中の垂直な破線矢印のように、接着強度の変動率 η_R の値により必要な安全率 S_c の値は大きく変化し、特に P_f の値が 0.01 (1%) 以下になると η_R の増加による影響が大きい。

また、接着継手を効率的に使用するためには、安全率は 5 前後にしたいが、例えば $S_c = 5$ の場合、Fig. 8 中の水平な破線矢印のように、接着強度の変動係数 η_R の値が、0.2, 0.25, および 0.3 と増加することにより（環境などによる接着強度のばらつきの増加に起因）、故障確率 P_f の値は、 3×10^{-5} , 7×10^{-4} , および 4×10^{-3} と大きく増加する (Fig. 11 ~ Fig. 14 参照)。

Fig. 11 および Fig. 12 (Fig. 5 および Fig. 6 に相当) に、

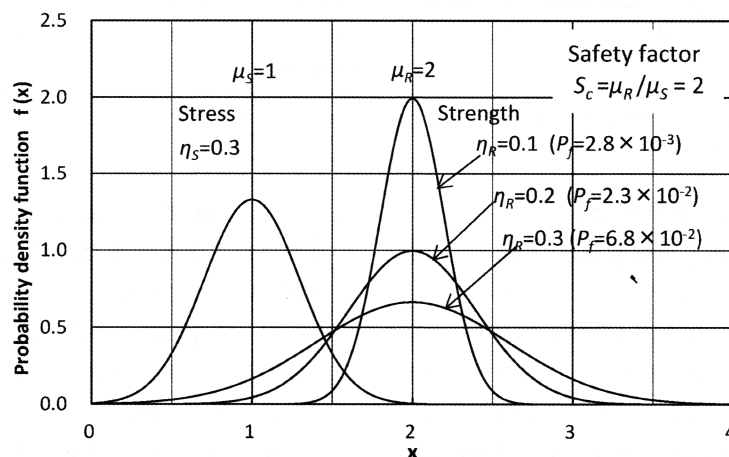


Fig. 11 Distribution of stress x_R and strength x_S (when safety factor $S_c = 2$)^{5~7)}.

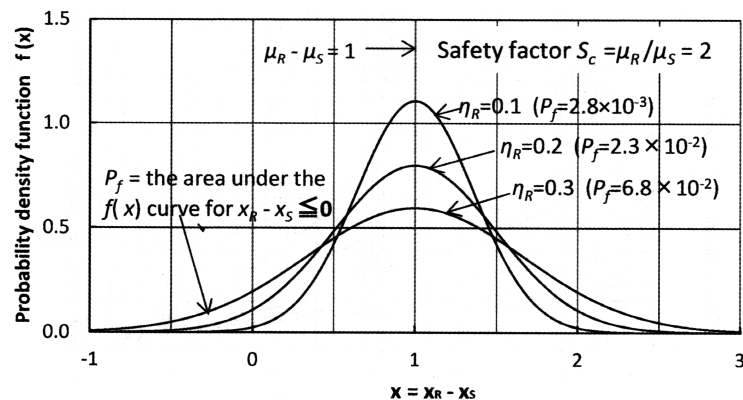


Fig. 12 Distribution of $x_R - x_S$ (when safety factor $S_c = 2$)^{5~7)}.

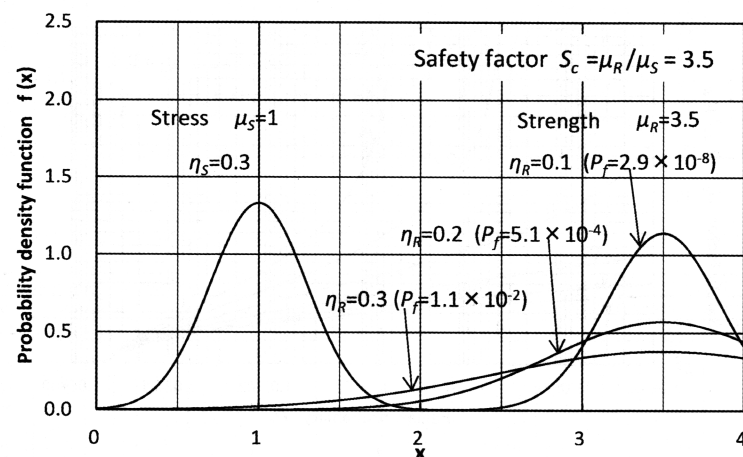


Fig. 13 Distribution of stress x_R and strength x_S (when safety factor $S_c = 3.5$).

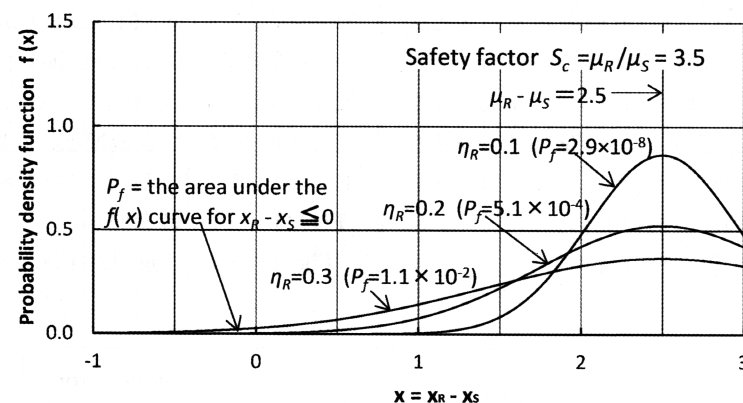


Fig. 14 Distribution of $x_R - x_S$ (when safety factor $S_c = 3.5$).

安全率 S_c が 2 の場合、強度の変動係数 η_R を 0.1 ~ 0.3 に変化させた時のストレス曲線と強度曲線及び $x = x_R - x_S$ 曲線の変化を示す。Table 1 中にも P_f の計算結果を示す。

また、JIS B 8267 圧力容器の設計 (ASME ボイラーと圧力容器規格 Section VIII, Division1 と整合) において、安全係数 (引張強さ / 許容応力) = 3.5 となっているのを参考にして、Fig. 13 および Fig. 14 には、安全率 S_c が 3.5 の場合の同様の曲線を示すとともに、Table 1 中にも P_f の計算結

果を示す。Fig. 11 ~ Fig. 14 から、 $S_c = 2$ の場合は両曲線の重なりおよび P_f がまだ大きい、 $S_c = 3.5$ とすれば P_f の値が桁違いに小さくなるのがわかる。

さらに、実際の使用条件において、Fig. 1 に示したように、環境暴露により接着強度のばらつき (η_R) の増加とともに接着強度平均値 μ_R が減少する場合は、式 (18) の安全率 S_c が低下するため、Fig. 8 中に示すように右下がりの破線曲線となり、故障確率 P_f の値がさらに増加する。合

わせて、Table 1 中の Fig. 8 に対する P_f の計算結果も参照されたい。

Fig. 5 および Fig. 8 ~ Fig. 10 (ストレスの変動係数 $\eta_s = 0 \sim 0.3$) において、安全率 $S_c = 3.5$ に対して、故障確率 $P_f = 10^{-6}$ (100 万分の 1)、 $P_f = 10^{-5}$ (10 万分の 1)、および $P_f = 10^{-4}$ (1 万分の 1) を確保するために必要な接着強度の変動率 η_R の値を読み取ると (Table 2 の計算シートにおいて、 $S_c = 3.5$ となるように η_R の値をトライアルで修正する)、Table 2 のように、それぞれ 0.15 ~ 0.12, 0.17 ~ 0.14, および 0.19 ~ 0.17 となる。

劣化による接着強度の低下を考慮すれば、接着強度の初期変動係数は $\eta_R < 0.15$ が望ましいと考えられ、初期安全率が 3.5 より小さい場合は、さらに小さい初期 η_R が必要である。なお、耐用年数経過後において所定の故障確率 P_f を確保するためには、接着強度平均値 μ_R およびその変動係数 η_R の値は、耐用年数経過後または耐用年数分加速劣化試験後の試験片により測定した値を用いなければならない。

接着試験片を耐用年数分加速劣化させる方法については、次回総説¹⁵⁾「耐久性評価および寿命予測法」において述べる。

なお、Table 5 には、引張強さを基準強さとした Unwin の安全率を示す¹⁰⁾。この安全率の値には、以上のような信頼性工学的手法によって得られた値に加えて、材料の寸法効果、表面粗さ、切欠き係数などによる増加分が見込まれているものと考えられる¹¹⁾。

Table 5 Unwin's safety factor using tensile strength as the standard strength¹⁰⁾.

Material	Safety factor			
	Static load	Repetitive load		Impact load
		Pulsating	Alternating	
Steel	3	5	8	12
Cast iron	4	6	10	15
Wood	7	10	15	20
Brick・Marble	20	30	—	—

Safety factor: Standard strength of material / Allowable stress

4. 接着強度の変動係数実測値

接着強度の変動係数 η_R 実測値としては、著者らの実験結果¹³⁾によれば、Table 6 のように二液性室温硬化型エポキシ系接着剤 (試験片数 20 本) では 0.043 (室温) および 0.096 (湿潤: 49℃, 95% RH 中に 30 日間保持の耐久性試験後)、二液性室温硬化型ポリウレタン系接着剤 (試験片数 10 本) では 0.053 (室温) および 0.109 (湿潤: 前記条件の耐久性試験後)、Table 7 の一液性加熱硬化型エポキシ系接着剤 12 種類の場合 (試験片各 5 本), 0.013 ~ 0.088, 60 本の平均 0.040 (室温) および 0.010 ~ 0.076, 60 本の平均 0.036 (湿潤) という値が得られている¹³⁾。

代表的な航空機用アルミニウム合金の引張強さの変動係数が、0.026 ~ 0.047 であること¹²⁾から、前記の引張せん断接着強度 (室温, 劣化前状態) の変動係数が 0.05 前後であることは、妥当な値と考えられる。

5. 寿命試験, 加速劣化試験, または疲労試験による劣化後の継手の強度分布および変動係数の測定法および希望故障確率を得るための対策

接着継手は温度, 湿度, 応力または繰返し応力負荷により劣化が進行し、接着強度平均値 μ_R が低下するとともにばらつきおよび変動係数 η_R が増加する。

そこで、劣化後の接着強度の μ_R および η_R を得る方法を Fig. 15 に示す⁷⁾。

式 (25) は、次回総説「接着接合部の耐久性に関する加速試験と寿命予測法」¹⁵⁾において詳述する寿命 L と絶対温度 T , ストレスすなわち湿度 S_h および応力 S_m との関係を表すアイリングの式^{1,3,7)}である (右側の式は、絶対温度 T および湿度 S_h が一定の場合)。

$$L = a S_h^{-h} S_m^{-m} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) = a_1 S_m^{-m} \quad (25)$$

ここで、 $\exp(E_a/RT)$: アレニウス式項, E_a : 活性化エネルギー, a, a_1 : 定数, $-h$ および $-m$: それぞれ湿度 S_h およ

Table 6 Average values of tensile shear adhesive strength μ_R (kgf/cm²) and coefficients of variation η_R of joints using room temperature setting type adhesives¹³⁾.

Adhesive		Test condition (FS MMM-A-132A)											
		Room temperature				82°C				Wet condition (49°C, 95%RH, 30days)			
Type	Symbol	μ_R	μ_R (Av. value)	η_R	η_R (Av. value)	μ_R	μ_R (Av. value)	η_R	η_R (Av. value)	μ_R	μ_R (Av. value)	η_R	η_R (Av. value)
Two-component Epoxy type	E1	244	247	0.067	0.043	82	53	0.121	0.142	180	180	0.115	0.096
	E2	163		0.013		87		0.123		178		0.057	
	E3	239		0.063		22		0.137		111		0.151	
	E4	340		0.029		22		0.188		250		0.062	
Two-component Polyurethane type	U1	286	270	0.073	0.053	71	60	0.093	0.060	98	125	0.096	0.109
	U2	254		0.033		49		0.027		151		0.121	
Two-component acrylic type (SGA)	A	316		0.052		81		0.127		173		0.059	
High-performance double-sided pressure sensitive adhesive tape	P	9		0.042		2		0.051		6		0.077	

Adherend: SUS304 t1.5, Specimen width: 25mm, Lap length: 12.7mm, Ultrasonic cleaning using MEK: 3 times
Number of specimens: 5 for each adhesive

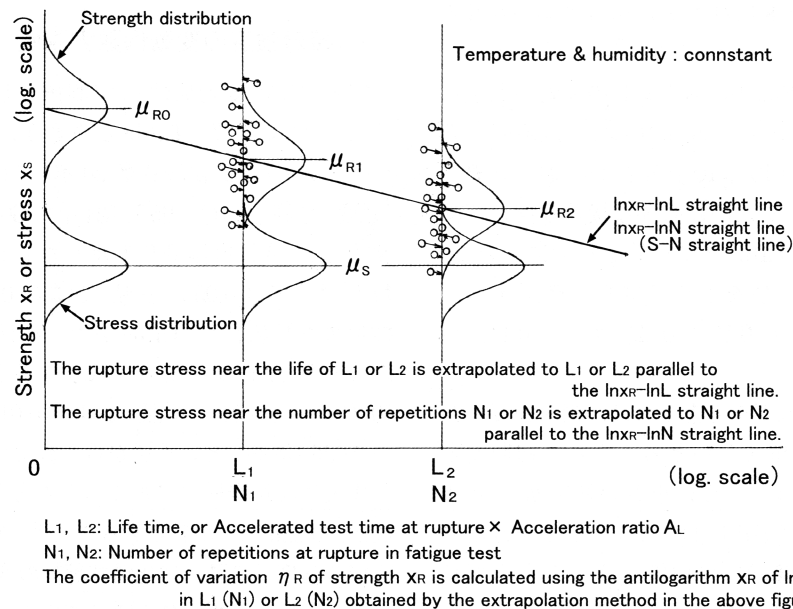


Fig. 15 A method of determining distribution (probability density function) of adhesive strength of joint at life L or N by life test, accelerated life test, or fatigue test⁷⁾.

Table 7 Average values of tensile shear adhesive strength μ_R (kgf/cm²), coefficients of variation η_R , and cohesive failure rate of joints r_c using one-component 120 °C setting epoxy type adhesives¹³⁾.

Adhesive		Test condition (FS MMM-A-132A)								
		Room temperature			82°C			Wet condition (49°C, 95%RH, 30days)		
Symbol	No.	μ_R kgf/cm ²	η_R	r_c %	μ_R kgf/cm ²	η_R	r_c %	μ_R kgf/cm ²	η_R	r_c %
C	1	284	0.042	0	214	0.079	0	153	0.037	0
	2	271	0.038	100	187	0.058	48	244	0.016	28
	3	298	0.039	0	225	0.074	0	212	0.042	0
	4	231	0.035	0	183	0.031	0	178	0.015	0
	5	326	0.032	0	233	0.039	0	211	0.069	0
	6	278	0.088	0	246	0.036	0	176	0.026	0
A	7	277	0.018	100	243	0.038	98	223	0.010	100
	8	289	0.037	0	215	0.018	0	175	0.029	0
	9	344	0.076	16	252	0.046	24	209	0.042	15
	10	303	0.015	10	239	0.023	10	236	0.022	12
	11	305	0.013	70	206	0.023	9	223	0.047	23
	12	294	0.044	52	196	0.015	3	229	0.076	14
Average v.		292	0.040	29	220	0.040	16	206	0.036	16

Adhesive symbol: will be explained in the next issue, "Durability evaluation and life prediction of adhesive joints"

Adherend: SUS304 t1.5, Specimen width: 25mm, Lap length: 12.7mm

Number of specimens: 5 for each adhesive, Ultrasonic cleaning using MEK: 3 times

び応力 S_m に関する指数で, $\ln L - \ln S_h$ 直線および $\ln L - \ln S_m$ 直線の勾配である。

式 (25) から, 実使用条件 (添字 1) に対する加速劣化試験条件 (添字 2) における寿命の比 L_1/L_2 すなわち加速係数 A_L は, 次式により表される^{3,7)}。

$$A_L = \frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{S_{h2}}{S_{h1}} \right)^h \left(\frac{S_{m2}}{S_{m1}} \right)^m \exp \left\{ \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right\} \quad (26)$$

Fig. 15 (両対数図) において, 式 (25) により強度 x_R (繰返し応力) と寿命 L は勾配が $-1/m$ の直線 ($\ln x_R - \ln L$) となる。先ず Fig. 15 の絶対温度 T および湿度 S_h が一定の条件下で寿命試験を行い, 多数の実験点から, 最適な $\ln x_R - \ln L$ 直線を決定する。次に, 寿命が例えば L_1 に一致する場

合はほとんどないので, 寿命が L_1 前後になった試験片の実験点 (x_R', L_1') から $\ln x_R - \ln L$ 直線に平行線を引き, L_1 垂直線との交点における応力を, 寿命 L_1 における 1 個の強度 x_R とする。

このようにして, 望ましくは 20 個以上の寿命 L_1 における強度 x_R を求めれば, 強度の平均値 μ_R および変動係数 η_R が得られるので, 応力の平均値 μ_S および変動係数 η_S の値を用いて, 式 (20) または Table 1 を用いて実使用期間 L_1 における継手の故障確率 P_f の値が求められるとともに, 式 (23) および Table 2 を用いて, 確保すべき故障確率 P_f のために必要な安全率 S_c の値を計算することができる。なお, x_R の値は対数ではなく真数を用いる。

一方、加速劣化試験の場合は、

実使用条件における推定寿命＝

$$\text{加速試験寿命 } L \times \text{加速係数 } A_L \quad (27)$$

であるから、式 (27) による推定寿命を Fig. 15 上にプロットすればよい。ここで、加速係数 A_L は、次式の温度および湿度に関する値を用いる。

$$A_L = \frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{S_{h2}}{S_{h1}} \right)^h \exp \left\{ \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right\} \quad (28)$$

すべての実験点を式 (28) の $\ln A_L$ だけ水平に右方に平行移動してプロットし、前記寿命試験の場合と同様にすればこの継手の実使用条件における強度の平均値 μ_R および変動係数 η_R の推定値が得られ、負荷応力の平均値 μ_S および変動係数 η_S の値を用いて、接着継手の故障確率 P_f の推定値 (予測値) および所定の P_f 確保のために必要な安全率 S_c が求められる。

また、応力振幅 S に対する破断繰返し数 N (寿命) との関係、すなわち S - N 曲線は、次式で表される³⁾。

$$SN^m = c \quad (29)$$

式 (29) から次式が導かれる。

$$N = c_1 S^{-1/m} \quad (30)$$

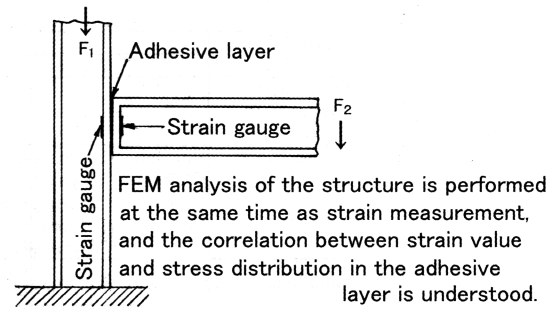
式 (30) は、前記式 (25) のアイリングの式^{1,3)}に一致する〔式 (25) の $m \Leftrightarrow$ 式 (30) の $1/m$ 〕。 N は繰返し応力負荷試験における寿命であるため、前記寿命試験の場合と同様に、接着継手に繰返し荷重 N が加わった場合の故障確率 P_f および所定の P_f 確保に必要な安全率 S_c の値を予測することができる。

6. 実際の接着構造物の運用により発生するストレス (応力) x_s の変動係数 η_s の測定法および必要な故障確率 P_f 確保の方法

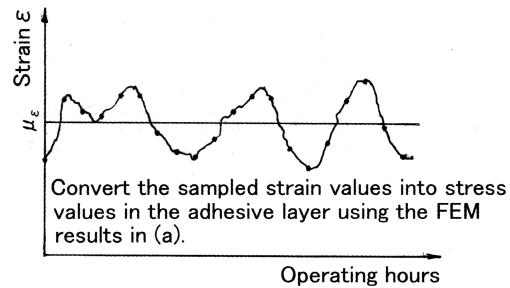
6.1 実構造物の接着層に発生するストレス x_s の変動係数 η_s の測定法

変動係数 η_s は、次の方法により測定できる。なお、構造物の自重による接着部の応力増加が無視できない場合はそれを考慮する。

- (1) Fig. 16(a) の例のように外力を加えた実構造物の FEM 解析を行い、接着層内で最大応力値が生じる箇所を見つけて、その部分の接着層応力 (例えば接着試験片と同一面積における平均値) とその点の構造物 (被着体) 表面のひずみとの関係を把握する。
- (2) Fig. 16(b) のように、構造物の表面 (最大接着応力値が生じる箇所) にひずみゲージを貼り付けて実構造物を実際に運用し、動ひずみ計によりその点におけるひずみの時間的変動を実測して記録する。



(a) Measurement of the strain of the bonded part caused by the operation of the bonded structure



(b) Sampling from measured strain values for bonded structures

Fig. 16 Measuring method of stress x_s and its coefficient of variation η_s generated in the adhesive layer by the actual operation of the adhesive structure.

- (3) 最大接着応力点において計測した (2) のひずみ値を一定時間毎にサンプリングし、(1) の FEM 解析結果に基づいて、接着層内応力に換算することにより、接着層内応力の分布、すなわち Fig. 5 の応力 x_s の分布が得られる。

6.2 希望する故障確率 P_f を得るための対策

6.1 項により得た x_s の測定結果を用いて、式 (1) および式 (2) により平均値 μ_s および標準偏差 σ_s が得られ、式 (19) により実構造物の接着層に働くストレス (応力) の変動係数 $\eta_s = \sigma_s / \mu_s$ が求められる。

このようにして得られた μ_s 、 η_s および接着強度の平均値 μ_R 、変動係数 η_R を用いて、式 (18) により安全率 S_c が定まり、その結果、式 (20) により、故障確率 P_f が得られる。

その故障確率 P_f が、設定目標値より大きい場合の対策としては、以下の方法が挙げられる。

- (1) 接着層に働くストレス x_s の平均値 μ_s を減少させ、安全率 S_c の増加を図る方法〔式 (18) 参照〕
 - ① 接着面積を増加させる。
 - ② 構造物を補強する (構造修正)。
 - ③ ボルト、リベット、スポット溶接などの機械的接合法を併用する。
- (2) 接着強度 x_R の平均値 μ_R を増加させ、安全率 S_c の増加を図る方法〔式 (18) 参照、併せて接着強度のばらつき

Table 8 Coefficients of variation η_s of various loads in Europe and America¹⁴⁾.

Type of load (Unit)	Area			
	Western Europe		USA	
Own weight (Weight)	Concrete	0.05 (Normal)		0.10 (Normal)
	Steel	0.02		
Movable load (Load strength)	Residence 50 years	0.40		
	Office 50 years	0.40		
	Store 50 years	0.30 (Extreme		0.25 (Extreme value I
	Parking 1 year	0.06		
	50 years	0.05		
Wind load (Wind pressure)	1 year	0.51 (Extreme	1 year	0.59 (Extreme value I
	50 years	0.20	50 years	0.37
Snow load (Load strength)	1 year	0.33 (Extreme	1 year	0.73 (Log-normal)
	50 years	0.22	50 years	0.26 (Extreme value II
Seismic load (Maximum acceleration)	50 years	0.50 (Extreme		Depends on location
Researcher		Borges		Ellingwood

Note 1. The number of years is the data collection period, and () is the distribution format.

Note 2. Average value of η_s in the above table = 0.297

の減少を図る]

① 適切な表面処理方法に変更する

シランカップリング剤使用、アンカー効果の増大法、などの対策を講じる。

② 接着強度がより大きい接着剤に変更する。

③ ①および②により、接着強度 x_R のばらつきの減少、すなわち変動係数 η_R の減少が期待できる→故障確率 P_f が減少する (Fig. 12 および Fig. 14 参照)。

7. ストレス (荷重) の変動係数の実例

参考のため、欧米における自重、積載荷重、風荷重、雪荷重、および地震荷重の変動係数の事例を Table 8 に示す¹⁴⁾。なお、同表における変動係数は、一定期間 (例えば月、年) 内の負荷荷重の最大値を用いて算出されている¹⁴⁾。

Table 8 において変動係数は、短期間 (1 年間) の値より 50 年間の値の方が小さく、全平均値 = 0.297 となっている¹⁴⁾。

また、国内のシーバースの荷役用ドルフィン (栈橋の係留施設) に作用する最大荷重の 50 年間の変動係数は、0.087 ~ 0.290、平均値 0.200 であった¹⁴⁾。

3.3 項で示したように、故障確率の評価においては、ストレスの変動係数が大きい場合の方が故障確率が大きくなり安全側となるため、ストレスの変動係数が不明の場合は、0.2 ~ 0.3 程度とするのも一方法である。

8. おわりに

本総説では、ストレス-強度モデルに基づいて、応力お

よび劣化後の接着強度の平均値および変動係数を求める方法、ならびにそれらの値を用いた、正規分布に関する Excel 関数による接着継手の安全率と故障確率との関係および所定の故障確率確保のために必要な安全率の計算法についてご紹介した。これらの計算は、ご提供した Excel 計算シート (ver.2010) を用いれば容易に行えるのでご利用いただければ幸いである。

文 献

- 1) 塩見 弘, “改定三版 信頼性工学入門”, 丸善, p.74 (1998).
- 2) 川田雄一, 複合材料工学, 日科技連, p.956(1971).
- 3) 福井泰好, “入門 信頼性工学”, 森北出版, p.64, p.150(2007).
- 4) 真壁 肇(編), “新版 信頼性工学入門”, 日本規格協会, p.201 (2010).
- 5) 鈴木靖昭, “最新の接着・粘着技術 Q & A (佐藤千明編)”, 産業技術サービスセンター, p.244(2013).
- 6) 鈴木靖昭, “長期信頼性・高耐久性を得るための接着/接合における試験評価技術と寿命予測”, サイエンス&テクノロジー, p.121(2013).
- 7) 鈴木靖昭, “接着工学 異種材料接着・接合, 強度・信頼性・耐久性向上と寿命予測法”, 丸善出版, p.197(2018).
- 8) きたみあきこ, “EXCEL関数 逆引き辞典 パーフェクト 第3版”, 翔泳社, p.126, p.596, p.646(2019).
- 9) “機械工学便覧 基礎編 材料力学”, 日本機械学会, p.A4-136(1992).
- 10) “機械工学ポケットブック”, オーム社, p.2-59 (1976).
- 11) 島村昭治, 強化プラスチック, **13**, 131, (1967).
- 12) 上山忠夫, 造船協会誌, **No.438**, 25(1966).
- 13) 鈴木靖昭, 石塚孝志, 水谷裕二, 垣見秀治, 三木一敏, 石樽清孝, 渡辺慶知, にっしや技報, **40-2**, 50(1993).
- 14) 白石 悟, 上田 茂, 港湾技術研究所報告, **26**, No.2, p.509 (1987).
- 15) Y. Suzuki, J. Adhesion Soc. Jpn., **57**, (2021) (in press). (鈴木靖昭, 日本接着学会誌, 印刷中).

<Review>

Reliability Analysis Technology of Adhesive Joints

Yasuaki SUZUKI *

* Suzuki Adhesion Institute of Technology
131, Aza-yashiki, Ukino, Chiaki-cho, Ichinomiya-city,
Aichi-pref. 491-0806, Japan
(Accepted for publication : May 13, 2020)

Abstract

The reliability of the adhesive joint, that is, the probability that the joint functions properly, depends on the degree of durability against stresses such as temperature, humidity, mechanical stress, sunlight, wind and rain, the degree of joint strength and coefficient of variation, and the redundancy of the joint system such as spot welding and riveting used together or not.

Here, we will explain the method for promptly calculating the failure probability of adhesive joints after use for a certain period and the safety factor (average strength of the joint / average mechanical stress) required to secure the predetermined failure probability based on a stress-strength model using the EXCEL calculation sheet for the standard normal distribution function (NORMSDIST) and its inverse (NORMSINV).

Key words : Reliability, Stress-strength model, Failure probability, Coefficient of variation, Safety factor, Standard normal distribution function, Inverse function, EXCEL function, NORMSDIST, NORMSINV
