

解説

高信頼性接着の指針と設計基準

原賀康介*

要約

高信頼性接着を達成するための指針は、(1)凝集破壊率が40%以上、(2)接着特性の変動係数 CV が0.10以下であり、これらの条件を満足するところまで作り込むことが基本となる。初期の高温平均強度に対する設計許容強度の比は、安全率を2.0倍とした場合、静的荷重だけが負荷される場合は1/20、低サイクル疲労が負荷される場合は1/22、高サイクル疲労が負荷される場合は1/40となる。

キーワード：高信頼性接着、凝集破壊率、変動係数、設計基準、設計許容強度

1. はじめに

「高信頼性接着」とは、接着に要求される機能に対して優れた特性を有することはもちろん、特性のばらつきが小さく、耐久性にも優れ、しかも、生産性にも優れた接着のことであり、宇宙・航空・防衛機器や車輛・自動車、建設・土木などの構造接着、電子・光学機器などの高精度接着、飲料缶・包装のような短タクト接着などのあらゆる接着分野の基礎となる技術である。

接着接合は、他の接合方法にはない多くの特徴を有することから、あらゆる分野で適用されるに至っているが、その品質の信頼性に対する指針や設計基準は明確化されていないのが実情である。このような状況で適用が拡大していくと、将来、大きな事故や社会生活の混乱にも繋がりがかねない。

「品質」は、安全で安心な社会や地球環境保護の点からも最重要事項である。本稿では、高信頼性接着の指針と設計基準について述べる。本稿では、接着に要求される機能として、接着強度を扱っているが、他の要求機能に対しても考え方は同様である。

2. 信頼性向上のための基本的な考え方

信頼性に優れるというのは、品質のばらつきが小さく、不良率が低いということである。許容できる不良率の上限値（許容不良率）は、製品の設計段階で設定されるものである。図1は、接着強度の分布であり、許容不良率の上限強度 p が接着部に加わる最大の強度 P_{max} より大きければ不

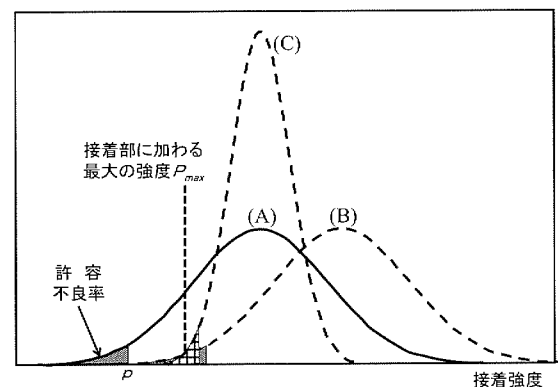


図1 不良率を低減するための二つの改善方法

良率は許容不良率以下にとどまる。接着強度の分布(A)では、許容不良率以上の不良が発生するので改良しなければならないが、(B)のように平均強度を高くして改善する方法と、(C)のように平均強度はそのままではばらつきを小さくする方法がある。改善の難易度としては(C)が(B)より容易な場合が多い。本稿では、「強度ばらつきの低減」を信頼性向上の基本的な考え方としている。

3. 高信頼性接着の指針

3.1 凝集破壊率

接着接合部を破壊した場合の破壊形態には大きく分けて次の二種類がある。最も頻繁に見られるのは、被着材料と接着剤との結合界面で破壊する「界面破壊」である。もう一つは、接着剤の内部で破壊する「凝集破壊」である。被着材料の接着表面は、接着性に影響する多くの因子が集まったところであり、これらの因子を常に最適な一定状態に

平成26年1月12日受付

* 原賀接着技術コンサルタント

URL : <http://www.haraga-secchaku.info/>

管理することは困難なため、「界面破壊」の場合は、接着強度のばらつきが大きくなる¹⁾。「凝集破壊」は接着剤内部での破壊であり、接着強度は接着剤の物性で決まるため、接着強度のばらつきは小さい。

許容不良率が 1/10 万や 1/100 万を要求される場合は、凝集破壊率（接着面積全体に占める凝集破壊部分の面積の割合）は、40%以上ある事が必要である¹⁾³⁾。凝集破壊率が 40%以下である場合には、表面処理や表面改質などによって凝集破壊率を向上させることが必要である。

3.2 接着強度の変動係数

接着強度のばらつきを表す指標として、変動係数 CV （＝標準偏差/平均値）を用いる。接着部が劣化すると、平均強度の低下とばらつきの増加が起こる¹⁾⁴⁾が、許容不良率が 1/10 万や 1/100 万を要求される高信頼性接着においては、劣化後でも許容不良率の上限強度 p は、少なくとも平均値の 50%以上は確保できていることが必要である。これを満足するためには、初期（劣化前）の変動係数 CV は 0.10 以下であることが必要となる¹⁾²⁾。

なお、強度試験時に被着材に大きな伸びや変形が生じず、凝集破壊率が 40%以上であれば接着強度の分布は正規分布となる⁴⁾ので、本稿では全て正規分布として扱っている。

凝集破壊率と変動係数 CV には一般に相関があり、凝集破壊率が高くなると変動係数 CV は小さくなる。高信頼性接着を達成するためには、凝集破壊率が 40%以上、変動係数 CV が 0.10 以下になるところまで作り込むことが基本となる。

4. 高信頼性接着達成のため手段

4.1 接着部の脆弱箇所

図 2 に示すように、接着剤硬化時に生じる硬化収縮応力や加熱硬化後の冷却による熱応力(A)、低温環境における熱応力や外力が加わった時の応力集中(B)は、接着面の端部界面で最も大きくなる。接着部が水に濡れる場合は、水分は接着面の端部界面から最も浸入しやすい(C)。このように、接着面の端部界面は接着部の脆弱点である¹⁾ため、界面で

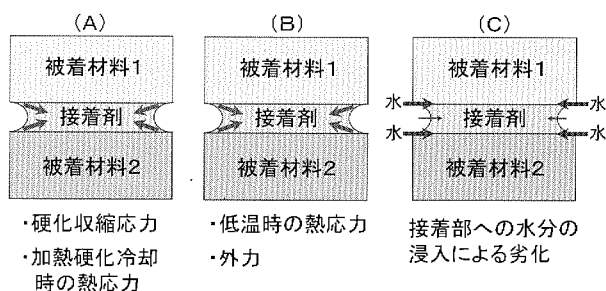


図 2 接着部の脆弱箇所

の結合を強化して、界面破壊をなくして凝集破壊に移行させることが重要である。

4.2 界面での結合の強化

接着剤と被着材表面は分子間力により結合している。分子間力を強くすることにより、界面破壊をなくして凝集破壊に移行させることができる。その手段としては、低圧水銀ランプやエキシマランプによる短波長紫外線照射、大気圧プラズマ照射、コロナ処理や火炎処理などの表面改質が効果的である。被着材と接着剤のそれぞれと反応しやすい官能基を有するカップリング剤やプライマーを被着材表面に塗布する方法もある。カップリング剤やプライマーは薄く塗布することが重要である。

5. 接着の実力強度

5.1 破断強度と平均強度

接着強度は、破断試験を行い破断強度の平均値で表されることが多い。しかし、この平均破断強度は接着の実力強度とはいえない。接着の実力強度を明確にしなければ、信頼性の高い強度設計はできない。

5.2 接着の実力強度に影響する因子

接着の実力強度を求めるために、次の強度低下因子を考える。なお、以下の説明では、高信頼性接着の指針である、凝集破壊率は 40%以上、変動係数 CV は 0.10 以下まで作り込まれていることを前提としている。

(1)接着強度の温度依存性

接着強度は測定温度によって変化し、一般には高温で強度が低下する。製品の接着部の使用温度範囲の最高温度での接着強度で考える必要がある。

(2)接着強度のばらつき

接着強度にはばらつきがあり、許容不良率の上限強度で考える必要がある。許容不良率での上限強度 p は、変動係数 CV と許容不良率から求めることができる¹⁾⁷⁾。平均強度に対する p （許容不良率での上限強度）の比を「ばらつき係数」と呼んでいる¹⁾⁷⁾。

(3)内部破壊の発生

図 3 に示すように、接着部に力を加えていくと最終的には破断するが、破断以前に接着部の内部ではすでに破壊が始まっている¹⁾。破断以前に生じる破壊を内部破壊と呼ぶ。小さな力で内部破壊が生じる場合は、繰返し疲労が加わるような場合には、内部破壊が進行して短時間で破断することになる。内部破壊が始まる強度（内部破壊発生開始強度）を考えることが重要となる。

(4)劣化による強度低下とばらつきの増加

図 4 は、初期と劣化後の接着強度の分布を示したもので

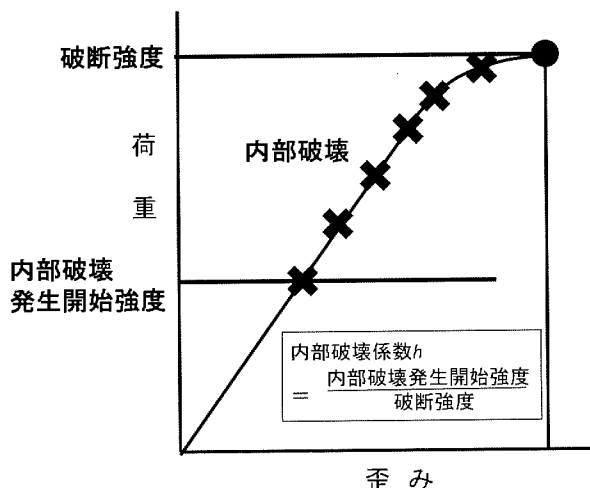


図3 接着継手の荷重-歪み線図における内部破壊の発生の模式図

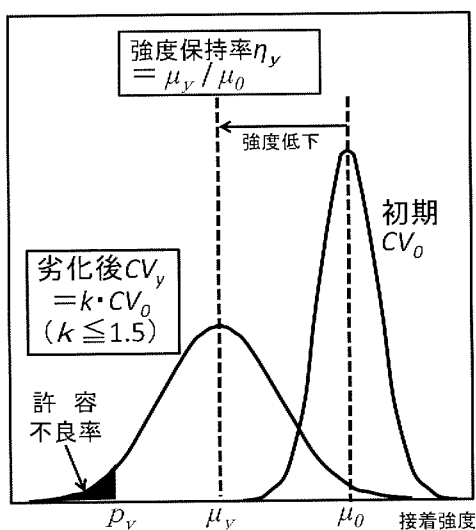


図4 劣化による接着強度の低下と強度ばらつきの増大

ある。劣化により接着強度は低下し、ばらつきは増加する¹⁾⁴⁾⁶⁾。劣化によるばらつきの増加は、変動係数の増加として扱う。筆者が行った多数の長期劣化試験の結果から、劣化による変動係数の増加率 k は、屋外で30年間程度使用された場合でも、最大で初期の1.5倍と考えることができる¹⁾⁴⁾⁶⁾。使用期間や使用環境がより楽な場合は、変動係数の増加率 k を1.4倍や1.3倍としても良い。

初期の平均強度 μ_0 に対する劣化後の平均強度 μ_y の割合 (強度保持率 η_y) は、高信頼性接着である以上、50%以上は確保出来ていることが必要と考えられる。強度保持率が50%以下に低下するような場合には、予測できない劣化モードによる破壊を引き起こす可能性があるためである。

初期の変動係数 CV_0 が0.10、劣化による変動係数の増加率が1.4倍 (劣化後の変動係数 $CV_y=0.14$)、許容不良率が

1/10万とすると、劣化後の許容不良率での上限強度 p_y は、劣化後の平均強度 μ_y の40%となる。

5.3 内部破壊発生開始強度

内部破壊発生強度は、次の三つの条件について考える。

- (1)静的荷重のみが加わる場合、(2)高サイクル疲労が加わる場合、(3)冷熱繰返しなどの低サイクル疲労が加わる場合。

5.3.1 静的荷重のみが加わる場合

表1は、AE (アコースティックエミッション) により、凝集破壊する場合と界面破壊する場合について、破断荷重に対して最初のAE (ひび割れ音) が発生する荷重の比を測定した結果である¹⁾⁴⁾。この結果より、凝集破壊の場合は、破断荷重の50%以上の荷重負荷でひび割れが生じていることがわかる。界面破壊の場合は、破断荷重の10%以下の荷重負荷でも内部破壊が始まっており、界面破壊は凝集破壊にくらべて強度信頼性が非常に低いことが分かる。ここでは凝集破壊の系に限っているので、静的荷重のみが加わる場合の内部破壊係数 (破断荷重に対する内部破壊発生開始荷重比) h_1 を0.5と仮定する。仮定としたのは、AE測定の実データは非常に少ないためであり、今後のデータ蓄積が待たれるところである。

表1 AEによる内部破壊発生開始荷重比の評価結果

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

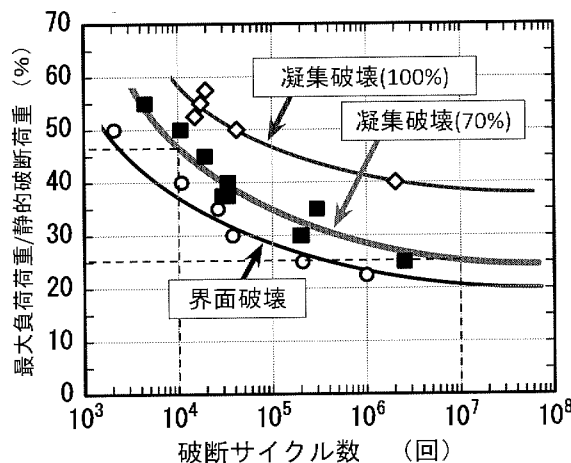


図5 凝集破壊率と疲労試験結果

5.3.2 高サイクル疲労が加わる場合

疲労破壊は内部破壊の蓄積によるものと考え、図 5^{1),4)}に示すように、疲労試験の結果から求めた。高サイクル疲労の場合は、破断サイクル数 10^7 サイクルにおける最大負荷荷重の破断荷重に対する比を内部破壊係数 h_2 とし、凝集破壊率 70% の試験結果から求めると、 $h_2=0.25$ となる。

5.3.3 低サイクル疲労が加わる場合

5.3.2 と同様に、破断サイクル数 10^4 サイクルにおける最大負荷荷重の破断荷重に対する比を内部破壊係数 h_3 とすると、 $h_3=0.45$ となる。

6. 接着強度の設計基準

6.1 接着の実力強度（設計基準強度）

使用環境の最高温度下における高温強度 μ_T をベース強度として、 μ_T に対する接着の実力強度（設計基準強度） P の比率を「設計基準強度比 P^* 」と表すと、

$$\text{設計基準強度比 } P^*$$

$$= \text{設計基準強度 } P / \text{高温強度 } \mu_T$$

$$= \text{内部破壊係数 } (h_1=0.5, h_2=0.25,$$

$$h_3=0.45) \times \text{劣化後のばらつき係数 } D_y (\geq 0.4) \times \text{劣化後保持率 } \eta_y (\geq 0.5)$$

となる。

表 2 に、設計基準強度比 P^* の計算結果を示した。劣化後の強度保持率が 50% で劣化後のばらつき係数が 0.40 の場合の、高温強度に対する設計基準強度比 P^* は、静的荷重負荷の場合は 1/10、低サイクル疲労負荷の場合は 1/11、高サイクル疲労負荷の場合は 1/20 となる。

6.2 設計許容強度

設計許容強度とは、実際に設計に使用できる上限の強度であり、設計基準強度 P を安全率 S で除した強度である。高温強度 μ_T に対する設計許容強度の比率を設計許容強度比 P_S^* とすると、

$$\text{設計許容強度比 } P_S^* = \text{設計基準強度比 } P^* / \text{安全率 } S$$

となる。設計基準強度には、内部破壊、劣化、ばらつきなどの強度低下要因が含まれているため、安全率 S は大きくとる必要はなく、1.5 倍～2.0 倍程度で良いと思われる。

表 2 に、設計許容強度比 P_S^* の計算結果を示した。劣化後の強度保持率が 50% で劣化後のばらつき係数が 0.40 の場合、安全率が 2.0 倍の場合は、高温強度に対する設計基準強度比 P_S^* は、静的荷重負荷の場合は 1/20、低サイクル疲労負荷の場合は 1/22、高サイクル疲労負荷の場合は 1/40 とな

る。

あとがき

高信頼性接着を達成させるためには、まず、凝集破壊率を高くして、変動係数を小さくすることが基本である。本稿で述べた設計基準強度や設計許容強度は、短い開発期間の中で多くの評価試験や検証試験なしで接着が適用できるかどうかを簡易に判断するためのものである。設計基準は一種のマニュアルであるため、結論だけ示せばそれで良いのだが、少なくともその基準に至った経緯は理解した上で利用していただきたい。

表 2 設計基準強度比 P^* と設計許容強度比 P_S^* の計算結果

内部破壊係数 h	劣化後		設計基準強度比 P^* (安全率 $S=1.0$)		設計許容強度比 $P_S^* = P^*/S$	
	保持率 η_y	ばらつき係数 D_y	$P^* = h \cdot D_y \cdot \eta_y$	安全率 $S=1.5$ $P^*/1.5$	安全率 $S=2.0$ $P^*/2.0$	
静荷重負荷 $h_1=0.50$	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)	
低サイクル疲労 $h_3=0.45$	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)	
高サイクル疲労 $h_2=0.25$	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)	

参考文献

- 1)原賀康介：接着の技術誌，V01.32，No.3，62 (2012)
- 2)原賀康介：日本接着学会誌，V01.43，No.8，319 (2007)
- 3)原賀康介：工業材料，V01.58，No.2，45 (2010)
- 4)原賀康介：日本接着学会誌，V01.39，No.12，448 (2003)
- 5)原賀康介：Polyfile，Vol.50，No.591，66 (2013)
- 6)原賀康介：接着の技術誌，V01.24，No.2，58 (2004)
- 7)原賀康介：日本接着学会誌，V01.40，No.11，564 (2004)

全般的な参考書籍

- ・原賀康介：高信頼性接着の実務，日刊工業新聞社，(2013)
- ・原賀康介：高信頼性を引き出す接着設計技術，日刊工業新聞社，(2013).

日本材料科学会誌

材料の科学と工学

Materials Science and Technology of Japan

Vol. 51 No.2 2014

特集・最近の接着技術動向

Special Issue on
The Recent Trend of the Functional
Adhesives and Techniques

日本材料科学会

The Materials Science Society of Japan

URL : <http://www.mssj.gr.jp/>