

[解説 1]

高度化する接着技術における高信頼性・耐久性ニーズの変化と具体的対策

(株)原賀接着技術コンサルタント 原賀 康介*

はじめに

自動車分野では、CO₂排出量削減を目的として、軽量車体の開発が必須となっており、鋼、アルミニウム、FRP、FRTFなどを適材適所に使用するマルチマテリアル構造への移行が進みつつある¹⁾。CO₂削減への取組みは、自動車や鉄道車両などの各種移動体の軽量化だけでなく、電力の総発電量の60%を消費しているモータの永久磁石化による省エネルギー化も活発に行われている²⁾。これらの技術開発においては異種材料の接合技術が重要であり、従来の接合法に変わって接着接合が注目されており、新たな接着剤も種々開発されている。

しかし、接着接合は樹脂による界面を有する接合であるため、強度や信頼性、耐久性に影響する因子が非常に多く、溶接やボルト・ナット、リベットのような設計基準や設計法はいまだに確立されていない。このような状況の中で、各種機器への高度な接着接合の適用事例が脚光を浴びているが、これらは多大なる評価試験と検証試験のもとに成り立ったものであり、広範囲の産業分野への水平展開が容易に行えるものではない。接着の専門家ではない設計者が簡易に用いることができる

「接着設計法」は絶対に必要である。

接着接合部の強度は破断試験で求めるほかないため、破断強度があたかも真の接着強度であるかのように使われていることも、金属など従来からの構造材料では考えられない状態である。また、接着接合はほかの接合に比べてばらつきが大きいという大きな課題を有しているにもかかわらず、接着の特性が平均値で扱われていることは問題である。ばらつきを考慮して統計的に信頼性を考える必要がある。

接着の耐久性や寿命予測に関する研究は非常に少なく³⁾、多大な評価試験を行っても適用できるかどうかを判断できない場合も多い。耐久性は、接着剤、被着材料とその表面、環境・応力条件によって決まると思われているが、劣化のメカニズムを明らかにすることによって、必要な劣化率となる継手設計(耐久性設計)を行うことは可能である。

接着の作業性、強度特性、信頼性、耐久性を向上させる方法として、接着剤と冶金的接合法や機械的締結を併用する複合接着接合法⁴⁾は有力な手段であり、種々の複合化技術の開発が今後重要になってくる。

ここでは、高品質な接着を多大な評価試験なしで短期間に開発・適用するための強度設計法、耐久性設計、複合接着接合法について述べる。

*はらが こうすけ：専務取締役 首席コンサルタント
〒659-0042 兵庫県芦屋市緑町1-9-301
E-mail : haraga-kosuke@kcc.zaq.ne.jp

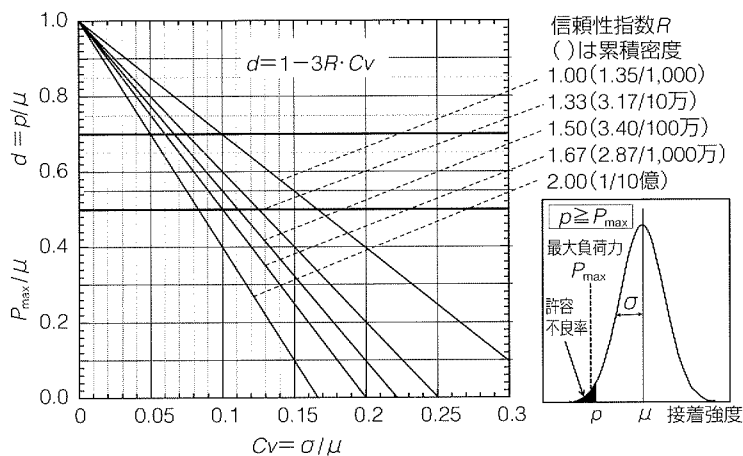


図1 信頼性指数 R 、変動係数 Cv とばらつき係数 d 、接着部に加わる最大負荷力 P_{max} の関係

ばらつき、劣化、内部破壊を考慮して高品質を確保する「 Cv 接着設計法」

1. 「 Cv 接着設計法」とは

この設計法は、想定以上の不良を発生させないという「高信頼性」と「特性のばらつきの少なさ」を両立させて「高品質」を確保するために、接着強度のばらつき、劣化、内部破壊を考慮して、接着部に加わる力に対して初期の平均強度が何倍になるように接着部を設計すればよいかを簡易に求められる設計法である。

この設計法を用いるためには、高信頼性接着の基本条件^{1)~5)}である、①初期の接着部の凝集破壊率は40%以上であること、②初期の接着強度の変動係数 Cv は0.10以下であることの2つの条件を満足するところまで作り込まれていることが最低限必要である。

2. 信頼性とばらつきの指標

被着体の伸びや変形が小さく接着部の凝集破壊率が高い場合には、図1右下に示すように、接着強度は正規分布になる³⁾。製品の耐用年数までに、想定以上の不良を発生させないためには、あらかじめ許容できる不良率の上限値(許容不良率)を設定する。分布全体の面積を1とすると、最低強度から強度 p までが許容不良率に相当し、1/10万、1/100万、1/1,000万などと累積密度で表される場合と、工程能力指数の C_p 値で1.33、1.50、1.67な

どと表されることも多い。工程能力指数の C_p 値が1.33、1.50、1.67は、それぞれ累積密度3.17/10万、3.40/100万、2.87/1,000万に相当する。接着強度は非破壊で検査ができないため、信頼度を表す指標として工程能力指数をそのまま適用することはできないため、本稿では、工程能力指数の定義を借りて、式(1)のように、「信頼性指数 R 」を定義する。

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

ここで、 μ ：平均値、 σ ：標準偏差、 p ：許容不良率における上限強度である。

信頼性指数 R は、工程能力指数と同様に、1.33、1.50、1.67などを用いる。

接着強度のばらつきは、平均値 μ に対する許容不良率の上限強度 p の比 p/μ が1に近く分布の形状がシャープになるほど小さくなる。ここでは、 p/μ をばらつきの指標として「ばらつき係数 d 」と定義する。また、ばらつきの指標として、「変動係数 $Cv(=\sigma/\mu)$ 」も使用する。

3. 信頼性指数 R 、変動係数 Cv とばらつき係数 d 、接着部に加わる力の関係

式(1)から式(2)が得られ、図示すると図1の関係が得られる。

$$d = 1 - 3R \cdot Cv \quad (2)$$

図1から、信頼性指数 R が同一でも、変動係数 Cv の大きさによってばらつき係数 d は変化し、 Cv が小さいほど d は高くなり、品質が向上することが分かる。高品質を確保するためには、ばら

つき係数 d は、悪くても0.50、望ましくは0.70程度が必要であろう。これを満足するための変動係数は式(2)から求めることができる。

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。ここでは、接着部に加わる最大負荷力 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、 $p \geq P_{max}$ ($d \geq P_{max}/\mu$)が最低必要な条件である。

4. 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るわけにはいかない。ここでは、破断以前に内部破壊が始まる点を接着強度と考えることとする^{1), 3), 6), 7)}。

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た結果から、凝集破壊する場合の破断荷重に対するAE発生開始荷重の比を内部破壊係数 h_1 と表し、 $h_1=0.5$ とする^{1), 3), 6)}。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 10^7 回での強度の比を内部破壊係数 h_2 とし、 $h_2=0.25$ とする^{1), 3), 6)}。冷熱サイクルなどの低サイクルの熱応力の繰返しの場合は、静的破断強度に対する疲労試験の 10^4 回での強度の比を内部破壊係数 h_3 とし、 $h_3=0.45$ とする^{1), 3), 6)}。

5. 劣化による接着強度の低下とばらつきの増加

劣化により、接着強度は低下する。図2に示すように、初期の平均強度 μ_0 に対する劣化後の平均強度 μ_y の比を劣化後の接着強度の保持率 η_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0.5以上、望ましくは0.7以上を保っていることが必要と考える。

図2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。劣化によるばらつきの増加は、初期の接着強度の変動係数 CV_0 が k 倍に増大して CV_y になるとして扱う。 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でよいと考えられる^{3), 6), 7)}。

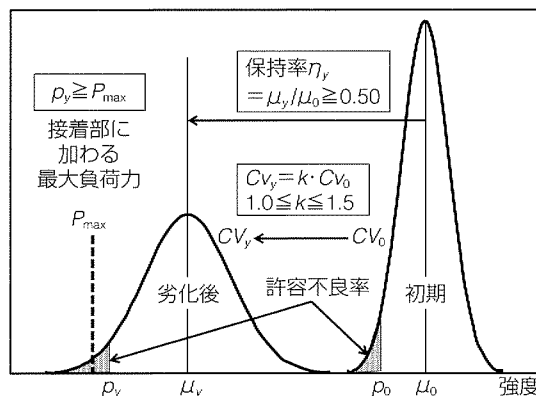


図2 劣化による接着強度の低下とばらつきの増大および許容不良率における上限強度 ρ と接着部に加わる最大負荷力 P_{max} の関係

6. 最大負荷力に対する初期の平均破断強度の必要倍率を求める設計式

内部破壊を考慮しない場合、接着部に加わる最大の力 P_{max} に対して、初期の平均強度 μ_0 は何倍とれば高信頼性の接着ができるかは式(3)で求めることができる。許容不良率を示す信頼性指数 R は1.33、1.50、1.67などにあらかじめ設定しておく。

$$\mu_0 / P_{max} \geq 1 / [\{ 1 - k(1 - d_0) \} \eta_y] \quad (3)$$

ここで、 d_0 :初期のばらつき係数、 k :5. 項で示した劣化による変動係数の増加率、 η_y :劣化後の保持率で、あらかじめ設定する。

ただし、この μ_0 は内部破壊発生開始強度と考えるべきであるので、初期の平均破断強度 μ_{0h} は μ_0/h となる。ここで、 h は4項で示した内部破壊係数である。

さらに、安全率 S を見込むと、初期の必要平均破断強度は $\mu_{0h} \cdot S$ となる。これを μ_{0hS} と表すと、接着部の最大負荷力 P_{max} に対する初期の平均破断強度 μ_{0hS} の必要倍率は式(4)となる。

$$\mu_{0hS} / P_{max} \geq S / [h \{ 1 - k(1 - d_0) \} \eta_y] \quad (4)$$

安全率 S は、すでにばらつき、内部破壊、劣化を考慮しているなので、1.5~2.0倍でよいと考えられる*。

*紙面の都合で詳細を記載できなかったが、当社ホームページ <http://www.haraga-secchaku.info/> に詳細が示されているので参照願いたい。

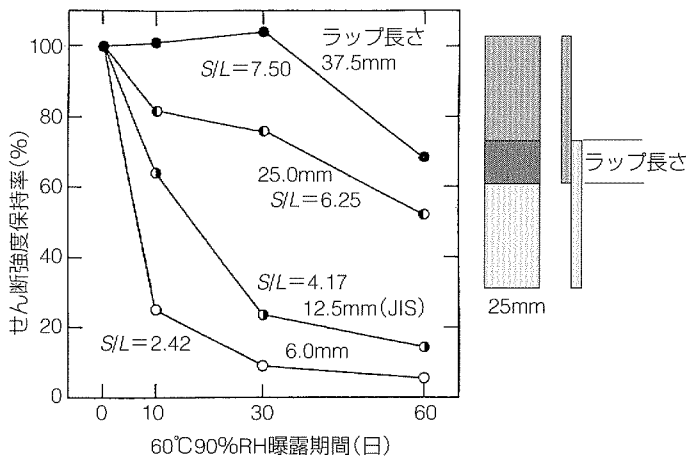


図3 引張りせん断試験片のラップ長さを変化させた場合の耐湿性の違いの例 (ステンレス、アクリル系接着剤)

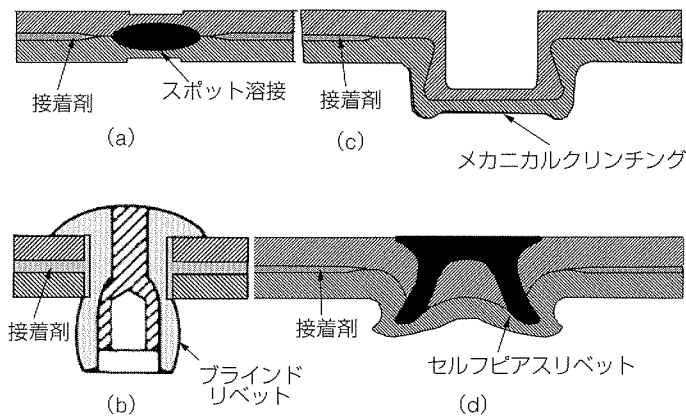


図4 複合接着接合法の例

耐久性の作り込みのための耐久性設計

接着部の耐久性は、接着剤、被着材料、表面状態、加わる力や環境によって決まると思われていることが多く、接着剤の選定や表面処理の検討に多大な労力が費やされていることが多い。しかし、接着の劣化に大きな影響を及ぼす水分劣化やクリープ劣化は接着部や部品の設計によって、任意の劣化率に制御することが可能である。

図3は、幅25mmの単純重ね合わせ引張りせん断試験片において、ラップ長さのみを変化させた場合の耐湿性試験結果の比較である。ラップ長さを長くすることで、劣化が大きく低下していることが分かる。これは、接着面積 S /接着部外周の長さ L が大きいほど耐水性に優れているためである^{1), 3)~5), 7)}。幅が W で細長い接着部の場合、幅を2倍、3倍、4倍と大きくすると、劣化速度は1/4、

1/9、1/16と遅くなっていく^{1), 3)~5), 7)}。任意の劣化率になるように S/L や W を決めることで、水分劣化を制御することができる。

接着部にクリープ力が加わっている状態で水分が浸入すると、クリープ劣化が加速される^{1), 3), 5)}。以下に述べる複合接着接合法を採用することによって、クリープ応力を低減することができる。

接着の欠点を補い信頼性を向上させる複合接着接合法

複合接着接合法は、接着剤と点溶接やリベット、ボルト、かしめなどの機械的締結を併用した接合法である^{1), 3), 5)}。図4に、代表的な複合接着接合法の例を示した。同図(a)は接着剤とスポット溶接の複合でウェルドボンディングと呼ばれている方法、(b)は接着剤とブラインドリベットの複合でリベットボンディングと呼ばれている方法、(c)

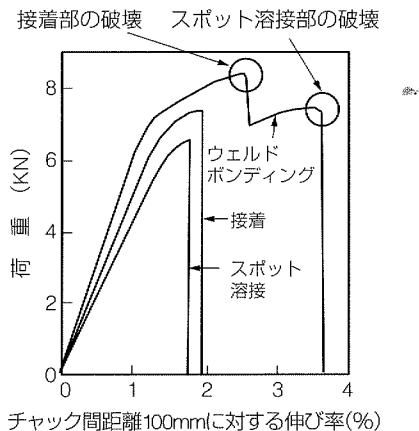


図5 接着、スポット溶接、ウェルドボンディングの伸びと荷重の関係

は接着剤とメカニカルクリンチングの複合、(d)は接着剤とセルフピアスリベットの複合である。このような複合接着接合法により、接着剤の問題点である作業性や強度特性、信頼性を大きく改善することができる。

強度・信頼性の点では、破断に対する冗長性の拡大、高温における接着強度の低下の防止、剥離開始点の補強、クリープ劣化の低減、疲労特性の向上などの効果が得られる^{1), 3), 5)}。

図5は、接着、スポット溶接、接着とスポット溶接の併用(ウェルドボンディング)の引張りせん断試験における伸びと荷重の関係である^{1), 3), 5)}。スポット溶接や接着だけの場合は、一度破壊すると破断してしまうが、ウェルドボンディングでは、最初にラップ端部の接着部が破壊してもすぐには破断せず、スポット溶接とその周辺の接着剤でもう一度荷重に耐えている。

破壊までに要したエネルギーは、併用接合では、単独接合の約3倍に向上している。一度の破壊で破断に至ることは危険で避けなければならないが、併用接合では破断に対する「冗長性」が大きく改善され、定期検査によるクラック発見での補修も可能となる。

図6は、60℃90%RH雰囲気中でのクリープ破断特性の比較である。リベットやスポット溶接を併用することによって、接着のクリープ破断特性が大きく改善されることが分かる。ウェルドボン

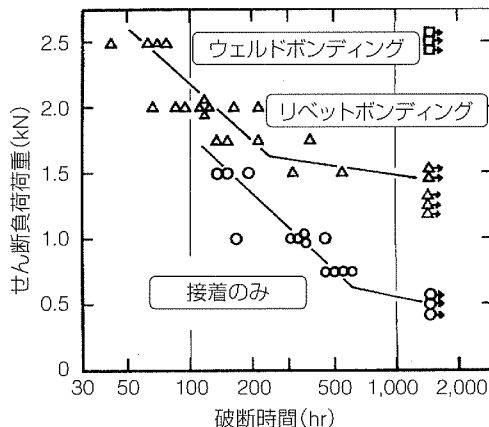


図6 ウェルドボンディング、リベットボンディングによるクリープ特性の改善例(60℃90%RH雰囲気中)

ディングではクリープ破断は見られなくなっている^{1), 3), 5)}。

おわりに

接着のニーズは多機能・高度化してきており、接合性能のみならず高信頼性や高耐久性が求められている。しかし、汎用の接合法として設計者が容易に扱える域には達していないのが現状である。本稿では、高品質な接着を短期に開発するための強度設計法、耐久性設計、複合接着接合法について述べた。ここで述べたようなことを考慮して適切な設計を行うことにより、多大な評価試験や検証試験なしで高品質な接着の実現にこぎ着けると思われる。

参考文献

- 1) 原賀康介、佐藤千明共著:「自動車軽量化のための接着接合入門」(日刊工業新聞社)、pp.9-36、88-107、133-146、154-158、p.161(2015)
- 2) 原賀康介著:「高信頼性接着の実務—事例と信頼性の考え方—」(日刊工業新聞社)、pp.46-54、122-128(2013)
- 3) 原賀康介著:「高信頼性を引き出す接着設計技術—基礎から耐久性、寿命、安全率評価まで—」(日刊工業新聞社)、pp.119-215(2013)
- 4) 原賀康介:「信頼性の高い耐久性評価と寿命予測法」、工業材料、Vol.58、No.2(2010)、p.45
- 5) 原賀康介:「接着接合系の信頼性と耐久性」、日本接着学会誌、Vol.50、No.3(2014)、p.101
- 6) 原賀康介:「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」、日本接着学会誌、Vol.50、No.2(2014)、p.53
- 7) 原賀康介:「信頼性確保のための接着強度の実力値の見積もり方」、接着の技術誌、Vol.32、No.3(2012)、p.62

工業材料

2015
6
Vol.63 No.6

特集

多機能・高度化するニーズに応える接着技術の最新展開

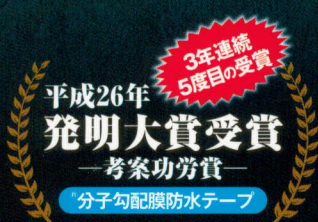
新連載 日本発!世界に先駆けるナノ粒子と加工技術—材料開発の基盤技術をさぐる—

高透明度粘着弾性シート

®メークリンゲル

Mayclean Gel

<特許出願中>



®分子勾配膜はKYGの環境ブランド
共同技研化学株式会社
<http://www.kyg-tape.co.jp>