

接着設計技術と実効接着強度の考え方

原 賀 康 介

(三菱電機(株)先端技術総合研究所)

1. はじめに

接着剤による接合は、ほかの接合方法にはない多くの長を有することから、多方面で使用されている。しかし、長期耐久性が要求されたり力が加わる製品に接着接合を採用することにはかなりの抵抗が有することも事実である。この一因としては、接着の接合機構がケミカルであり、ボルト・ナットや溶接、かしめなどに比べてファジーな要素が多いこと、データベースがほとんどなく、特性に影響する因子が多いため、接着に熟知していない技術者には扱いにくいこと、接着部の設計基準や製品の耐用年数経過後の接着部の強度の算出方法などが不明確であること、などが上げられる。

上記のような問題が一扫され、接着が「接合法」の一つとして一般に認知されるにはまだ時間がかかると思われるが、以下に、その1ステップとするために、筆者が考えている接着設計技術と接着強度低下係数の考え方について述べる。

2. 接着設計技術

2.1 2次元から3次元の技術へ

製品開発は、設計部門、生産技術部門、材料部門の連携により行われる。これら3部門の「接着」に関わる関係を概念的に図1¹⁾に示した。X軸は、デバイスが必要とする機能および材料に要求される機能(電氣的、熱的、機械的、光学的、化学的など)に関する軸であり、Y軸は材料の種類や物性(エポキシ系、ウレタン系、光硬化、ガラス転移温度、弾性率、収縮率、膨張係数など)に関する軸であり、Z軸は、デバイスの構造や材質、組み立てプロセスなど(部品の材料、表面処理、接合部の形状・寸法、硬化方法・条件、接合の前後工程など)に関する諸因子である。一般に、X-Z面はデバイス開発・設計部門、X-Y面は材料部門、Y-Z面は構造設計・生産技術部門が担当しており、それぞれ専門性が高いため相互に立ち入ること

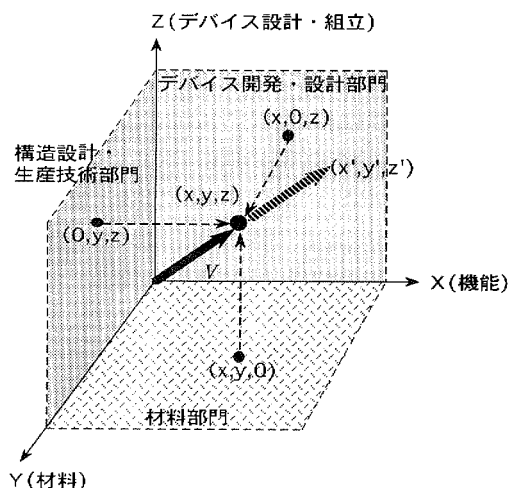


図1 「接着」に関わる3部門の関係

ができないことが多い。

例えば、光部品においてレンズやミラーを歪みなく接着する場合を考えてみる。デバイス開発・設計部門は機器の目的を達するためにレンズやミラーの形状・寸法や材質、取付部の形状・寸法や材質、歪みの許容値などを提示してくる $(x, 0, z)$ 。次に、材料部門では、要求機能の低歪みを実現するために硬化収縮率や膨張係数が低い材料の開発を行う $(x, y, 0)$ 。最後に、構造設計・生産技術部門では、デバイス開発・設計部門から出された機能上の制約条件の中で、材料部門が開発した材料を用いて、コンパクトで組み立てやすくするための構造やプロセス、設備を設計していく $(0, y, z)$ 。構造やプロセス、設備の面から材料部門へ改良の要求が出される場合も多い。このように、二次元的側面の組み合わせでは、デバイス開発・設計部門と構造設計・生産技術部門の両方から材料開発部門へ過大な要求を強いられることとなり、要求を満足できず機器の開発自体が困難になる場合もある。

ここで、最終的に求められているものは、二次元的なX-Z面(x, 0, z), X-Y面(x, y, 0), Y-Z面(0, y, z)上に存在するのではなく、X-Y-Z空間(x, y, z)上にある。二次元的座標の組み合わせでは(x, y, z)座標は1点に収束するとは限らない。1点に収束させるためには、それぞれの部門がベクトルVで目標座標(x, y, z)を目指していくことが必要である。これができると、目標座標の(x, y, z)はさらに大きな座標(x', y', z')に到達できることが期待される。

3部門を有機的に結びつけるためには、種々の要素技術についてしっかりした評価、解析を行いデータベースを蓄積しておくことが重要であり、その一つが次に述べる接着設計技術である。

2.2 接着設計技術と要素技術

「接着設計技術」とは、接着の利点を最大限に活用し、欠点をカバーして、高性能・高機能でばらつきが少なく信頼性に優れた製品を低コストで製造するための技術のことである。

「接着設計技術」は、図2²⁾に示すように、接着技術に関係する機能設計、構造設計、材料設計、プロセス設計、設備設計、品質管理などの要素技術から構成されている。これらの要素技術が、データベースやノウハウに裏付けされて有機的につながりシステム化されたものが「接着設計技術」である。

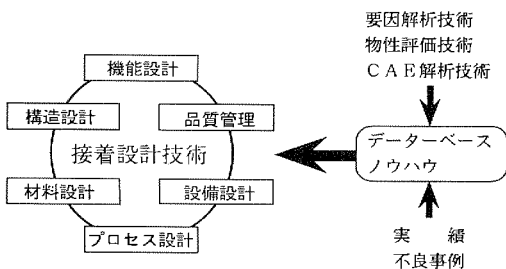


図2 接着設計技術の概念

各要素技術について要点を以下に示す。

(1) 機能設計

機能設計は、接着接合が有する多くの利点、機能を製品設計にいかにかうまく生かすかであり、一つの接着で接着のもつ効果をいかに多く達成させられるかがポイントである。

(2) 材料設計

材料設計では、接着剤に過大な要求を強いられるこ

とが多いが、被着材料の種類の変更や簡単な表面改質で接着特性が飛躍的に改良されることが多く、被着材料側の検討も忘れてはならない。また、プライマーやカップリング剤も重要な材料である。

(3) 構造設計

構造設計といえば、通常、高強度を得るための継手設計と考えられがちであるが、接着剤を利用した組み立てはねじや溶接など従来の構造のままではうまくいかない場合が多く、接着剤に適した部品構造を考えると大きなポイントである。例えば、接着剤を塗布しやすい構造、塗布した接着剤が垂れたり掻き取られたりしない構造、硬化までの仮固定が容易な構造、接着部のはみ出しを防止する構造など。また、耐久性の点でも接着剤自体に過大な要求がなされることが多いが、接着部の形状・寸法を変更するだけで要求特性を満足できることは多々ある。

(4) プロセス設計、設備設計

プロセス設計、設備設計は、材料設計および構造設計と表裏一体の関係にあり、コンクリートに検討を進めることが必要である。プロセス設計では、個々の作業工程における最適条件と許容範囲を明確にすることが重要であり、設備設計では常に許容範囲に入る設備を設計することが後の工程管理を容易にする基本である。なお、材料設計および構造設計では許容範囲をできるだけ広くできるように、プロセス設計、設備設計ではできるだけ最適条件に近い条件で作業ができるように材料、構造、プロセスを改良する。

(5) 品質管理

接着された物の良否の検査はきわめて困難であり、検査で不良が見つかったとしてもサルベージは容易ではない。そこで、接着の品質管理では、ばらつきが少なく再現性の高い接着特性を得るための事前の信頼性設計が重要である。信頼性設計は、材料設計、構造設計、プロセス設計、設備設計、品質管理の全てに関係している。ばらつきを減らして高い再現性を得るための基本は、接着特性に影響を及ぼすあらゆる因子を洗い出し、各因子および主要な因子の組み合わせにおけるデータを取り、各因子に対する最適条件と許容範囲を明確にすることである。

以上に述べた接着の要素技術を有機的に結びつけるためには、データベースの充実やノウハウの蓄積が必要となるが、これからはCAE(Computer-Aided Engineering)によるシミュレーション技術の活用が重要な役割を果たすと思われる。

3. 実効接着強度

3.1 実効接着強度とは

長期耐久性が要求されたり、力が加わる製品の組み立てに接着を採用する際に、設計者がまず知りたいデータは、長期間にわたり高い信頼性で接着性能を維持できる接着強度の実力値である。この実力値のことを筆者は「実効接着強度」³⁾と呼んでいる。

例えば、室温におけるせん断接着強度の平均値が20MPaであったとしても、20MPaで設計することはできない。クリープ、疲労、熱サイクル、熱・水・薬品・光などの環境も考慮して、製品の耐用年数の間加えることができる応力の上限値が接着強度の実力値、すなわち「実効接着強度」である。「実効接着強度」には「ばらつき」も当然考慮されるべきである。制御盤や配電盤をはじめとする各種の板金構造物の接着組立が6年ほど前から急速に拡大している^{3~5)}。この開発においては、データベースを整備し、設計マニュアルが作成されているが、この設計マニュアルでは、屋外使用で接着部の最高温度が80℃までで振動が加わる状態で25年から30年間使用される製品の場合、実効接着強度は0.75MPaとなっており、室温におけるせん断接着強度24MPaのわずか3%である³⁾。

3.2 実効接着強度の求め方

室温における静的な接着強度の平均値 τ_R から実効接着強度 τ_0 を求めるためには、図3に示すように、まず、各々の強度低下因子についてそれぞれ強度低下係数 η_i を求めて、次に全体の強度低下係数 η_0 を計算することと、接着強度のばらつき、再現性に対するばらつき係数Pを求めることが必要である。最後に、室

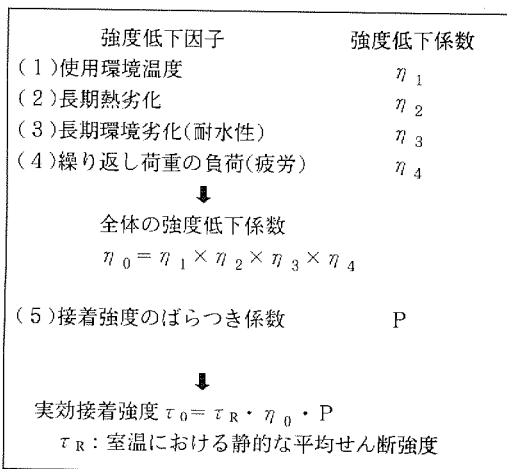


図3 実効接着強度の求め方

温における静的強度の平均値 τ_R に全体の強度低下係数 η_0 とばらつき係数Pを掛け合わせて実効接着強度 τ_0 を求める。

3.3 実効接着強度の事例

制御盤・配電盤などの板金構造物の接着組立における実効接着強度の計算事例を以下に示す。

(1) 強度低下係数

(1.1) 使用環境温度に対する係数 η_1

製品の接着部がさらされる上限の温度下で接着強度を測定する。この強度の室温強度 τ_R に対する比を求め、使用環境温度に対する強度低下係数 η_1 とする。この事例では、80℃における接着強度は室温の約1/3になるので、 $\eta_1=0.33$ としている。

(1.2) 長期熱劣化に対する係数 η_2

製品の接着部がさらされる上限の温度において熱劣化が生じる場合は、暴露温度を3レベル以上に变化させて熱劣化の加速試験を行う。その結果からアレニウスプロットを行い、使用上限温度で耐用年数後に強度がどこまで落ちるかを求め、暴露前の接着強度 τ_R に対する比を求め、長期熱劣化に対する強度低下係数 η_2 とする。この事例では使用上限温度(80℃)以上の100℃でも熱劣化による強度低下は認められなかったため、 η_2 は1.0としている。

(1.3) 長期環境劣化(耐水性)に対する係数 η_3

水による劣化は非常に大きな因子である。耐用年数後に強度が初期の30%まで低下する場合は、耐水劣化による強度低下係数 η_3 は0.3となるが、 η_3 が小さい場合、すなわち劣化が大きい場合には、耐水劣化のみならず思わぬトラブルの原因ともなるので、 η_3 は少なくとも0.7以上には設定したい。金属接着のように被着材料が水分を通さず、接着部への水分の浸入が接着部の周辺のみからである場合には、接着部の寸法を大きくすることにより接着部への水分の浸入の影響を小さくすることができる。このため、耐水性についての強度低下係数 η_3 は耐用年数、接着部の寸法により変化する。この事例では耐用年数後の耐水劣化率を20%($\eta_3=0.8$)と設定して、逆に必要な接着寸法を決定している。図4より、接着部寸法を50mmとれば32年後の接着強度保持率は80%となり、32年後の強度低下係数 η_3 が0.8ということになる。

(1.4) 繰り返し荷重(疲労)に対する係数 η_4

繰返し荷重による強度低下係数 η_4 は、疲労試験を行い、 10^7 サイクルで破壊する荷重から求める。この事例では、引張りの片振り繰返して試験を行った結果、

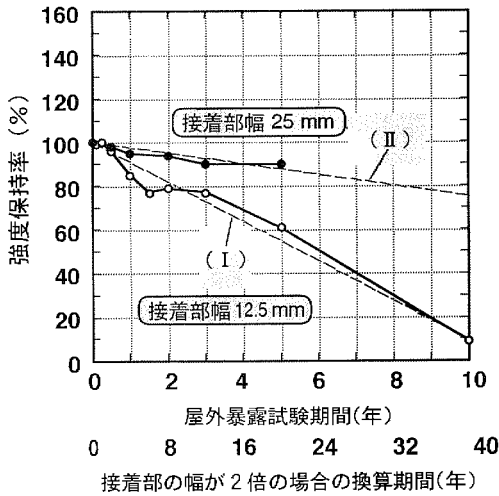


図4 接着部の幅が異なる試験片における屋外暴露試験結果と幅を変化させた場合の長期経時変化の予測

10⁷サイクルで破壊する荷重は静的強度 τ_R に対して0.33~0.4となる。一般に、引張り／圧縮の両振り試験では片振り試験に比べて破壊荷重は低下するといわれている。片振り試験と両振り試験の関係は、疲労限度線図の修正Goodman線図から求められる⁹⁾。片振りの0.33~0.4を修正Goodman線図で両振りに換算すると0.23~0.28となる。よって、繰り返し荷重による強度低下係数 η_1 は安全サイドに見積もって0.23としている。

(1.5) 全体の強度低下係数 η_0

全体の強度低下係数 η_0 は、上記の各因子に対する係数を掛け合わせたものであり、この事例での全体の強度低下係数 η_0 は0.06となる。

(2) 接着強度のばらつき、再現性に対するばらつき係数P

接着強度の分布が正規分布している場合、接着強度の下限值は、接着部に要求される信頼度R(例えば99.99%)と、接着強度の変動係数CV(標準偏差／平均値)によって決まる。この下限値と平均値 τ_0 の比がばらつき係数Pである。図5に、正規分布における接着強度の変動係数CVと信頼度Rとばらつき係数Pの関係を示した。図より、接着強度のばらつきが大きい場合、すなわち変動係数CVが大きい場合には、下限値が低くなり、ばらつき係数Pは小さくなることわかる。

この事例における接着強度の分布を図6に示した。

日時・作業を変えて、1回に5個ずつ36回に分けて接着した180個の結果である。この結果では、変動係

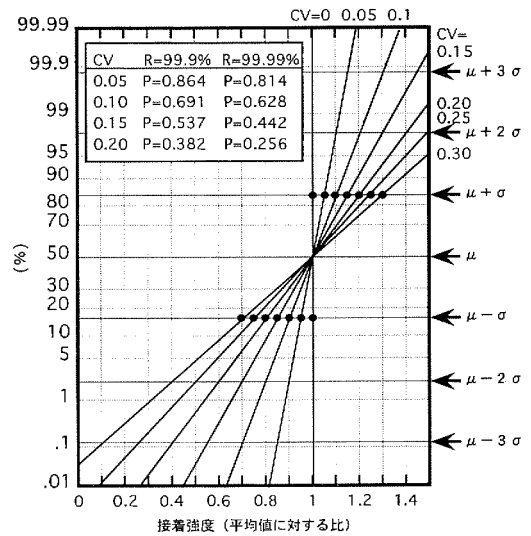
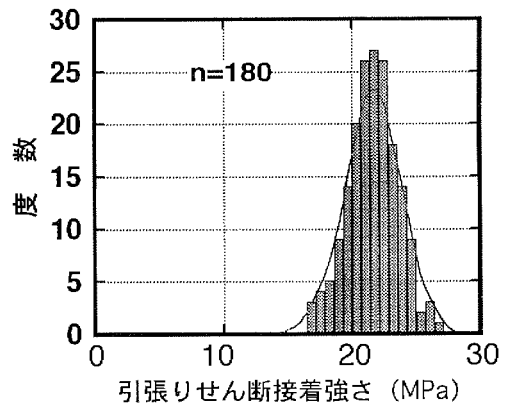


図5 正規分布における変動係数CVと信頼度Rとばらつき係数Pの関係



n 数	180個	分散	35.2MPa
平均値	21.5MPa	標準偏差	1.9MPa
最小値	17.0MPa	変動係数	0.088
最大値	26.5MPa		

図6 鋼板同士の接着における接着強さのヒストグラム(引張りせん断試験、板厚1.6t、重ね合せ長さ $l=12.5$ mm)

数CVは0.088となっている。安全サイドに考えて変動係数CVを0.1とすると、信頼度Rが99.99%の場合、図5よりばらつき係数Pは0.628となる。

(3) 実効接着強度 τ_0

実効接着強度 τ_0 は、室温における静的な平均せん断強度 τ_R に全体の強度低下係数 η_0 とばらつき係数P

表1 実効接着強度 τ_0 の算出例

使用温度範囲	-30~室温	~40°C	~60°C	~80°C
全体の強度低下係数 η_0	0.18	0.14	0.09	0.06
	↓	↓	↓	↓
ばらつき係数 P	実効接着強度 τ_e			
信頼度99.9%, 変動係数10% → P=0.691	0.12 τ_R	0.10 τ_R	0.06 τ_R	0.04 τ_R
信頼度99.99%, 変動係数10% → P=0.628	0.11 τ_R	0.09 τ_R	0.06 τ_R	0.04 τ_R
信頼度99.9%, 変動係数15% → P=0.537	0.10 τ_R	0.08 τ_R	0.05 τ_R	0.03 τ_R
信頼度99.99%, 変動係数15% → P=0.442	0.08 τ_R	0.06 τ_R	0.04 τ_R	0.03 τ_R

を掛け合わせたものであり、表1に、本事例の実効接着強度 τ_0 の温度別、信頼度別の計算結果を示した。この結果より、実効接着強度 τ_0 は、室温における静的な平均せん断強度 τ_R の0.12倍~0.03倍、すなわち、約1/8~1/30であることがわかる。

(4) 安全率 S

(3) で求めた実効接着強度 τ_0 が、製品の接着部に要求される強度の何倍の裕度を有しているかが安全率 S となる。

4. あとがき

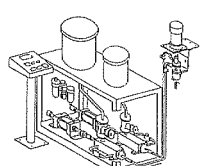
筆者が考えている接着設計技術と接着強度低下係数の考え方について述べた。接着設計技術の活用、接着強度低下係数の算出のいずれもデータベースが充実していることが必要である。接着材料・被着材料メーカー、接着ユーザー、設備メーカーが協力してデータベースを充実させていくことが、今後「接着」が「接合法」と一つとして認知されるためには必要であろう。

引用文献

- 1) 大場洋一：“今なぜ接着なのか”，有機エレクトロニクス材料研究会編(1998)ぶんしん出版，P.1~6.
- 2) 原賀康介：“電気・電子機器における接合設計”，有機エレクトロニクス材料研究会編(1998)，ぶんしん出版，P.7~42.
- 3) 中島，田口，眼龍，八木，原賀：“接着剤とリベット併用による板金筐体の設計・施工技術”，機械設計，41(4)，87(1997).
- 4) 眼龍，原賀，八木，駒沢，中島：“接着・リベット併用による配電盤・制御盤の組立技術”，三菱電機技報，69(12)，70(1995).
- 5) 原賀，眼龍，中島，八木：“接着・リベット併用による配電盤・制御盤の組立技術”，日本接着学会誌，32(1)，14(1996).
- 6) 田口：“接着剤を用いた金属筐体の組立工法”，自動化技術，28(7)，51(1996).
- 7) “接着・リベット併用組立法“MELARS”による大型フレーム筐体，塗装鋼板性筐体”，三菱電機技報，72(1)，86(1998).
- 8) 緑川，永田，原賀：“接着剤とリベットの併用による板金構造物の組立技術「MELARS」”，接着の技術，19(1)，85(1999).
- 9) 「機械工学便覧 基礎編」A4 材料力学，第9章 材料の強度，P.A4-121(社)日本機械学会。

**新しいニーズから
新しい商品へのチャレンジ!**
一般木工用から集成材・二次合板加工・特殊用途品まで.....
接着剤の事なら**リケンレジン☆リケンボンド**

二液反応型接着剤に最適な自動混合供給システム
オート ツイン ミキシング
☆3Kを解消。
☆接着剤ロスを約10~15%節約。
☆シンプルな構造で操作も簡単。
☆現行糊付機に取付可能。



IKEN **三木理研工業株式会社**
〒640-8441 和歌山市栄谷13-1 TEL 0734(51)2271(代)