

## &lt;解説&gt;

## XVI. 環境・エネルギーと接着

(受理:平成26年1月7日)

(3) 接着接合系の信頼性と耐久性  
Reliability and Durability of Adhesive Bonded Joints原賀 康介\*  
Kosuke HARAGA

## 1. はじめに

接着剤を接合部材として製品の組立てに使用する以上、製品の耐用年数まで問題なく機能することは当然の要求値である。「問題なく」というのは、耐用年数までの間に発生する不良率が、あらかじめ設定された不良率を下回っているということである。機能を失った場合に発生するリスクの種類、形態と大きさを十分に考えて、許容できる不良率の上限を設定しておかなければならない。設定された許容不良率を満たすためには、接着強度や接着歪みなどの製品の機能面から要求される接合特性のばらつきを小さくすること、使用時の環境や応力による劣化を小さくすることが必要である。これを達成するためには、接合特性のばらつき及び耐久性の評価方法、ばらつきや耐久性に及ぼす諸因子とその影響度合い、ばらつきや耐久性の評価試験で得られたデータの接合設計への生かし方、などを明確にする必要がある。接着接合が汎用的な接合方法の一つの選択肢として、溶接やボルト・ナットなどと同等に扱われるためには、汎用的な設計基準の存在が絶対条件となる。残念ながら、接着接合の分野において、これらのことは、溶接、ボルト・ナットなどの接合方法に比べて、大きく後れをとっているのが現状である。試行錯誤を繰り返して製品での検証試験によって信頼性を確保しているというのが現状である。

信頼性の低い製品を大量生産することは、資源や製造に関わるエネルギーの無駄遣いなど地球環境の保護の観点から避けなければならないことである。また、不良発生時の人命や生活、産業、都市機能への影響も十分に考慮しておかなければならない。かといって、過剰品質の物を作るとも地球環境保護の点から適当ではない。製品の耐用年数

まで問題なく機能する適切な設計がされた信頼性の高い製品を提供することは、製造者の責任である。

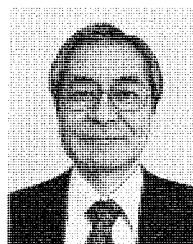
ここでは、接着特性の信頼性と耐久性の考え方、設計に影響する因子、併用接合による信頼性、耐久性の向上、設計基準について述べる。なお、本稿では、接着特性として接着強度について述べるが、接着強度以外の接着特性についても考え方は同じである。

## 2. 接着特性の信頼性

## 2.1 凝集破壊率

図1<sup>1,2)</sup>に、接着剤の内部で破壊する凝集破壊率と接着強度の関係の一例を示した。サンプル数  $n$  は 1213 個である。信頼性を考える時には、平均強度ではなく、低強度の

## 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：昭和48年（1973年）京都大学工学部工業化学科卒業、同年三菱電機(株)入社、生産技術研究所、材料研究所、先端技術総合研究所に勤務  
2007年より電気化学工業(株)に兼務出向。

2012年3月三菱電機(株)および電気化学工業(株)を退任。

2012年3月株式会社 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。

入社以来40年間にわたって一貫して接着接合技術の研究・開発に従事。

特に、構造接着技術と接着信頼性保証技術の開発に注力。

\* (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

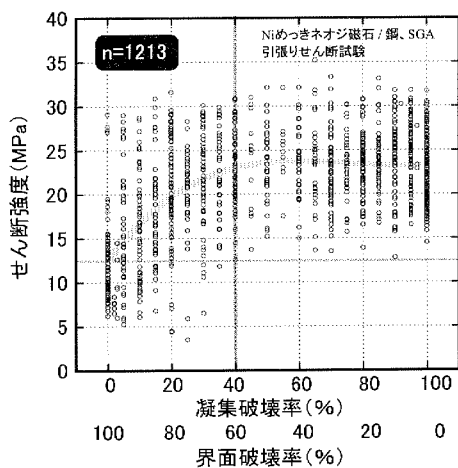


図1 凝集破壊率と接着強度の関係の一例

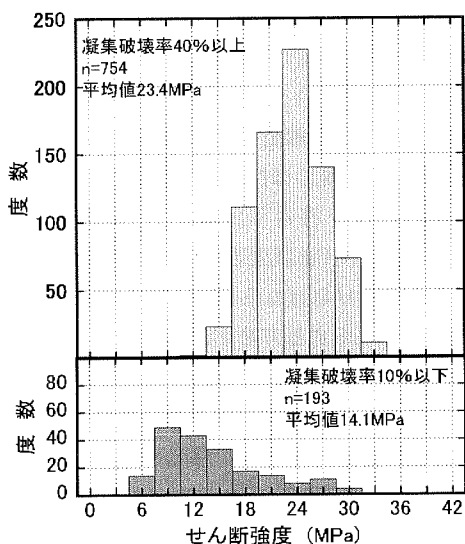


図2 凝集破壊率が40%以上の場合と10%以下の場合の接着強度の度数分布の比較

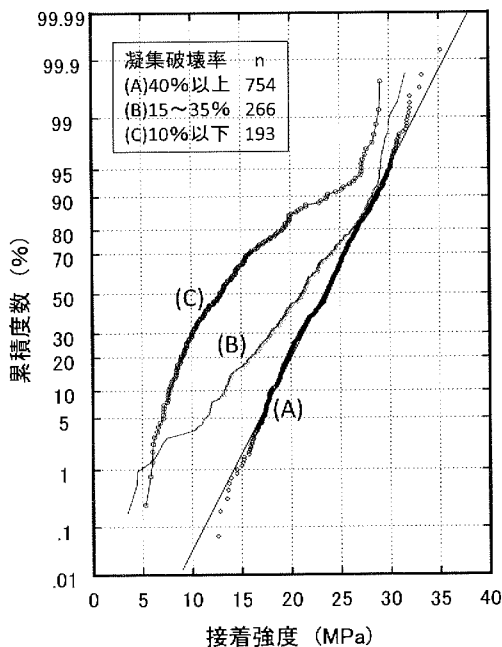


図3 凝集破壊率で区分した接着強度の正規確率プロットの比較

ものに注目することが重要である。この結果より、凝集破壊率が40%以下になると、低強度品が頻発していることがわかる。図2は、図1の凝集破壊率が40%以上の物と、10%以下の物のせん断強度の度数分布の比較である。凝集破壊率が40%以上では、平均せん断強度に対して左右対称の正規分布に近いが、凝集破壊率が10%以下では、低強度側に集中して高強度側に裾を引いた極値分布となっていることが分かる。正規分布になっているかどうかは、正規確率プロットをすれば明確になる。図3は、凝集破壊率が40%以上、15%~35%、10%以下のサンプルの正規確率プロットの比較である。きれいな直線になれば正規分布していると言える。(A)の凝集破壊率が40%以上の場合には、きれいな正規分布になっているが、(B)(C)のように、凝集破壊率が35%以下では、正規分布していないと言える。信頼性を考える時の基本は、正規分布になっていることである。

2.2 変動係数

図4<sup>1)5)</sup>は、正規分布である。正規分布において、設計段階で設定されている許容不良率  $F(x)$  の上限強度  $p$  を知ることが重要である。許容不良率は、一般に、1/10万から1/100万程度に設定される場合が多い。例えば、許容不良率が1/100万の場合は、分布全体の面積を1とすると、低強度側の1/100万の面積が許容不良率となる。許容不良率が同じでも、ばらつき(標準偏差  $\sigma$ )の大きさが正規分布の広がりには変化するの、許容不良率の上限強度  $p$  は変化する。許容不良率  $F(x)$  の上限強度  $p$  は、(1)式<sup>1)</sup>の、正規分布の分布関数から求めることができる。しかし、計算は簡単ではない。そこで、図5<sup>1)5)</sup>に示すように、許容不良率とばらつきから、容易に許容不良率の上限強度  $p$  を求める関係図を作成した。標準偏差  $\sigma$  および許容不良率における上限強度  $p$  は、平均強度  $\mu$  によって変化するの、図5においては、平均強度  $\mu$  で割って無次元化した変動係

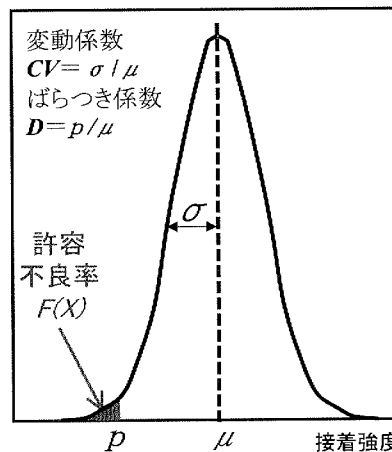


図4 正規分布における平均値  $\mu$ 、標準偏差  $\sigma$ 、許容不良率  $F(x)$  と許容不良率における上限強度  $p$

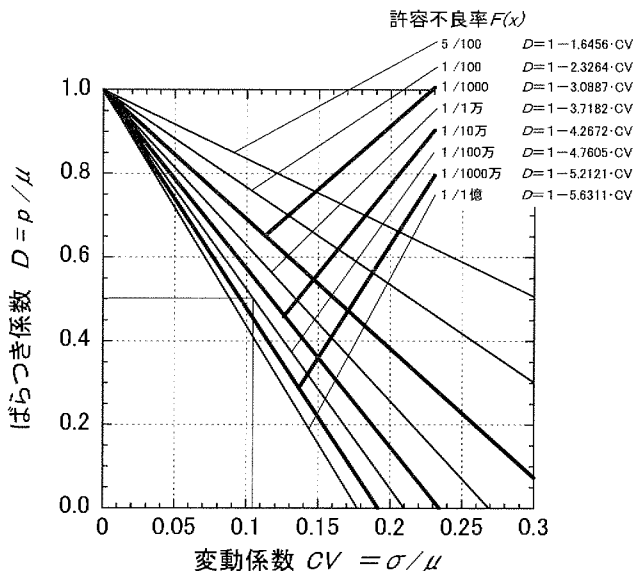


図5 正規分布における変動係数, 許容不良率, ばらつき係数の関係図

数  $CV (= \sigma/\mu)$ , ばらつき係数  $D (= p/\mu)$  で示している。

多数個の接着を行った場合, 接着強度は低強度品といえども平均値の50%は確保しておくべきであると筆者は考えている。即ち, 図5のばらつき係数  $D$  は, 0.5以上が必要ということである。このためには, 例えば, 許容不良率が1/100万の場合, 変動係数  $CV$  は0.105以下であることが必要となる。

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

以上の点から, 信頼性の高い接着を行うためには, 凝集破壊率を高くすること, 初期の変動係数  $CV$  は0.10以下が必要とすることが分かる。凝集破壊率を高くして接着特性の変動係数を小さくするためには, 表面処理や表面改質などを行って界面での結合を強化すると共に, 接着剤の物性を最適化するなどの作り込みが必要である。筆者が開発に携わった製品では, 初期の変動係数が0.03レベルまで押さえ込まれているものも多い<sup>1,3-5)</sup>。

### 2.3 劣化によるばらつきの増大

接着接合体が劣化すると, 接着強度の低下とばらつきの増大が起こる。

耐用年数経過時点での接着強度は, 初期の50%以上を維持していることが必要と筆者は考えている。劣化が大きすぎる場合は, 予測できない劣化モードが生じている可能性も有り, 不測の事態を招きかねないためである。

劣化によるばらつきの増大は, 変動係数  $CV$  の増大として扱う。屋外で30年間使用されるような接着体や, 筆者がこの40年間に実施してきた様々な環境や応力下での多くの耐久性試験の結果から, 劣化による変動係数の増大は,

初期の変動係数の1.5倍以内と考えられる。耐用年数が短い場合や, 使用環境がそれほど厳しくない場合は, 変動係数の増大は初期の1.4倍や1.3倍と考えて良い。例えば, 初期の変動係数  $CV_0$  が0.10, 劣化による変動係数の増加倍率  $k$  が1.4倍とすると, 劣化後の変動係数  $CV_y$  は0.14となる。許容不良率が1/10万の場合, 図5より, 劣化後のばらつき係数  $D_y$  は0.40となる。即ち, 許容不良率1/10万における劣化後の上限強度  $p_y$  は, 劣化後の平均強度  $\mu_y$  の40%の強度とすることである。劣化後の平均強度の保持率が初期の50%であったとすれば, 許容不良率1/10万における劣化後の上限強度  $p_y$  は, 初期の平均強度  $\mu_0$  の20%の強度とすることになる。

### 2.4 信頼性向上の基本的考え方

図6のデータ (A) (B) は, 図3のデータ (A) (B) と同じものである。

データ (B) を直線近似して外挿すると, 1万個に1個 (100万個に10個) は接着強度が0のものがあることが分かる。例えば, 許容不良率が1/100万, 許容不良率の上限強度  $p$  は5MPa以上と設定されている場合は, 信頼性を向上させなければならない。信頼性向上の手段としては, 平均値を高くする方法とばらつきを小さくする方法がある。

平均値を高くして信頼性を確保するためには, 図6に示すように, 直線①を直線②まで移動させる, 即ち, 平均強度を1.5倍から1.6倍に向上させなければならない。このような改良は容易ではない。

ばらつきを減らして改善する場合は, 直線①を直線③に改善することとなる。直線③は, 凝集破壊率40%以上の

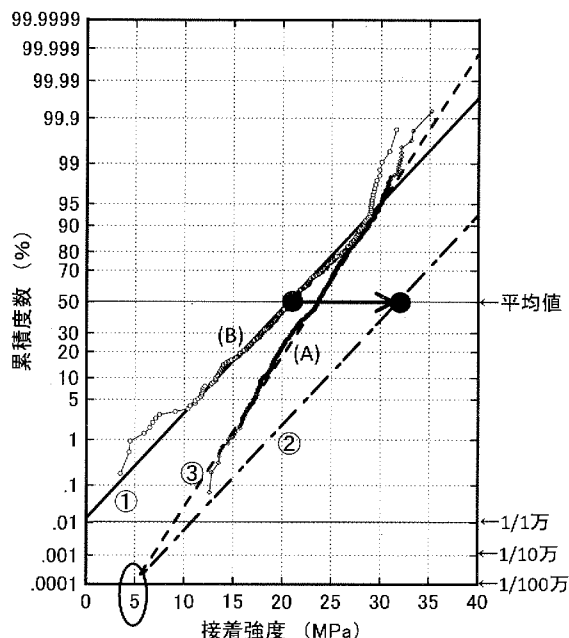


図6 信頼性向上の基本的考え方

実データ (A) の近似直線と同じであるので、接着条件を最適化して凝集破壊率を向上させれば、比較的容易な努力で改善ができる。

信頼性向上の基本は、平均値の向上ではなく、あくまでもばらつきの低減である。

### 3. 接着接合系の耐久性

#### 3.1 耐久性は設計マターである

接着接合物の信頼性を高くするためには、劣化を少なくすることが必要である。そのために、接着剤に過大な要求がされている場合が多く見られる。もちろん、将来に備えて接着剤の改良を行う事は必要であるが、設計者の勝手な要求に振り回された改良に、多大な時間と労力をつぎ込まれることは考え直さなければならない点であろう。耐久性は、与えられるものではなく、設計で作り込む物である。耐久性が少々劣っている接着剤でも、設計次第で問題の無い性能に作り込むことは可能であり、接着剤のユーザー、設計者はその努力を惜しんではならない。

#### 3.2 耐久性設計のための評価試験

##### (1) 水分劣化に及ぼす接着部の形状・寸法の影響

図7<sup>2,5,6)</sup>は、接着部が円形、正方形、正三角形のステンレス鋼の突き合わせ引張り試験片による耐湿試験の結果である。同じ形状でも寸法を変化させてある。接着剤はSGAで、80°C90%RH 雰囲気にて5日間暴露した後の接着強度保持率を示してある。この結果より、[接着面積  $S$  / 接着部の外周の長さ  $L$ ] が大きいほど劣化が少ないことが分かる。 $S/L$  が大きくなるように接着部の寸法設計を行えば、水分に対する耐久性は自由に設計が出来るということである。

図8<sup>1,5,6)</sup>は、細長い接着部における接着部の幅と屋外暴露劣化の試験結果である。幅が広い方が劣化が少ないこ

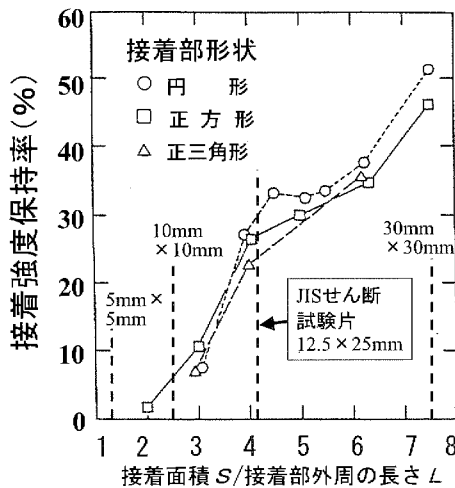


図7 水分劣化に及ぼす [接着面積  $S$  / 接着部外周の長さ  $L$ ] の影響

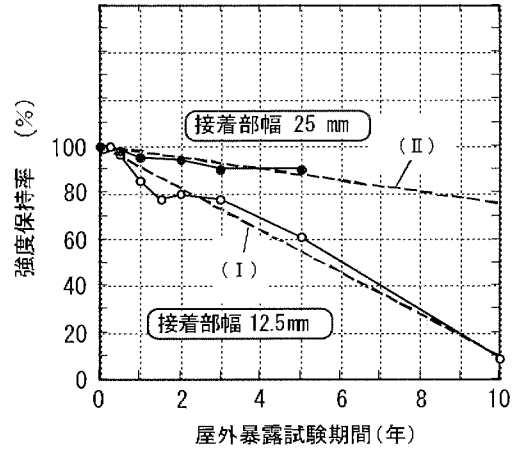


図8 細長い接着部における接着部の幅と屋外暴露劣化の関係

とが分かる。直線 (II) の傾きは、直線 (I) の 1/4 である。接着部の幅を 12.5mm から 25mm と 2 倍に広げると、劣化速度は 1/4 に低下している。水分の浸入は Fick の拡散の法則に従っているので、劣化速度は接着部の幅の比の二乗に逆比例する。接着部の幅を少し広げるだけで、水分劣化を大きく低減できる。

##### (2) 水分劣化における致命的損傷と非致命的損傷

水分劣化試験における強度低下は、接着部が致命的損傷を受けることによる強度低下と非致命的損傷による強度低下が合わさった結果として表れる。

水分による接着部の劣化の原因として次のことがある。

①接着界面に水分が浸入して、接着剤と被着材の分子間力を切断する、②接着部に浸入した水分によって被着材料自体が腐食などの劣化を起こす、③接着剤が加水分解を起こす、④接着剤が吸水膨潤して可塑化する。原因①②③は、水分を乾燥させても元の状態には戻らない致命的損傷となる。④は、乾燥させると元の状態に戻る可逆的変化で非致命的損傷である。屋外環境や乾湿が繰り返される環境においては、④は大きな問題ではない。

水分による致命的損傷劣化のみを正確に評価することは重要であり、乾燥回復性試験で評価できる。

図9は、3種類の接着剤 A, B, C から最も耐水性に優

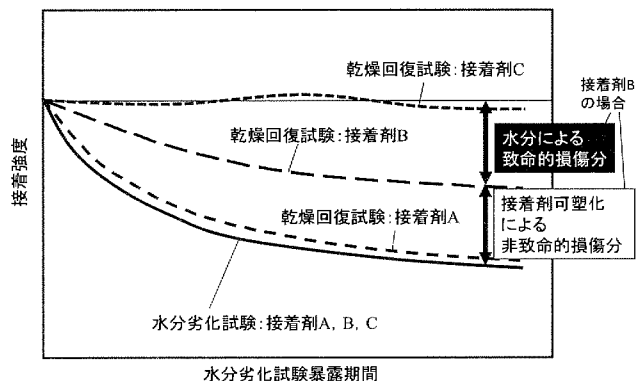


図9 吸水後の乾燥による接着強度の回復性の模式図

れたものを選定するための耐水性試験の模式図である。通常行われている水分環境に暴露後すぐに強度試験を行うと3種類とも同じ劣化であった。これでは優劣が付けられないが、乾燥後に強度試験を行うと、破線のように異なった結果となる。乾燥によって接着強度が回復した分は、上記の原因④による物で、乾燥しても強度回復しない部分が、原因①②③による致命的損傷を受けた部分となる。設計段階での材料選定は、劣化のメカニズムを考えて適切な評価試験を行うことが必要である。

(3) クリープ試験における水分の複合作用

図10<sup>2,6)</sup>は、鋼板同士をSGAで接着した引張り剪断試験片での、60°Cでのクリープ破断試験の結果であるが、相対湿度を変化させている。この結果から、温度が同じでも相対湿度が高ければクリープ強度は大きく低下することが分かる。設計には、湿度を加えた状態で得られたクリープ強度を用いなければ、思わぬ失敗を起こすことになる。

長期間のクリープ強度は、Larson-Miller法による評価試験で容易に求められるが、負荷荷重軸を普通軸で表示するか、対数軸で表示するかで、許容応力値が2倍程度変化することがあるので、両方で表示して安全サイドの許容応力値を採用すべきである。

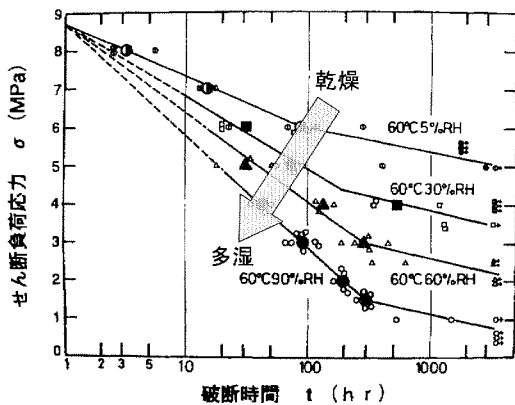


図10 クリープ試験における湿度の影響

(4) その他

その他にも、被着材料自体の強度が接着強度よりも低い場合の経時変化データの読み間違い<sup>7)</sup>、試験体と製品の接着部の形状の相違によるヒートサイクル試験結果の相違、繰返し疲労試験における $10^7$ サイクル以上での強度の扱い方など、試験体やデータの扱い方に注意すべき点があるので、規格の試験片や試験条件を鵜呑みにしないで、設計に活用できる試験方法を考えることが大切である。

4. 併用接合による信頼性、耐久性の向上

接着接合部の信頼性や耐久性を向上させる手段として併用接合は有効である。併用接合は、接着剤とスポット溶接、リベット、メカニカルクリンチング、セルフピアシングリ

ベット、かしめなどを併用する方法である。以下に、併用接合による信頼性、耐久性の向上効果を示す。

(1) 破壊の冗長性の向上

図11<sup>8)</sup>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)の引張り剪断試験における伸びと荷重の関係である。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。

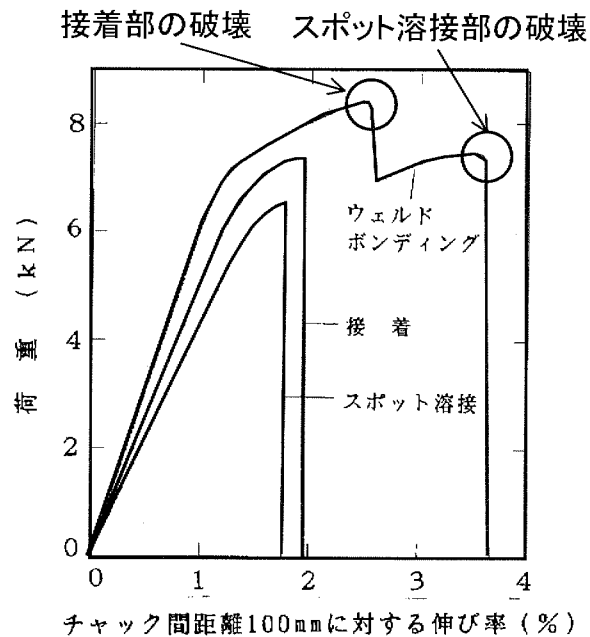


図11 接着、スポット溶接、ウェルドボンディングの伸びと荷重の関係

(2) 高温接着強度の改善

図12<sup>8)</sup>は、軟鋼板同士をSGAで接着した物とスポット溶接を併用した物の接合強度の温度依存性である。接着だけでは高温になると接着強度が大きく低下するが、スポット溶接を併用すると、高温でのラップ端部の破壊強度が大きく向上している。例えば、120°Cでの強度は、接着だけの場合の150kgから、スポット溶接併用では700kgと、約4.7倍に向上している。

(3) その他

併用接合では、接着剤だけの接合に比べて、クリープ特性や疲労特性を向上できることも知られている<sup>8)</sup>。また、はく離開始点の補強、火災などでの接着能力消滅時のバックアップなど、接着の信頼性、耐久性の大幅向上に効果的である<sup>8)</sup>。

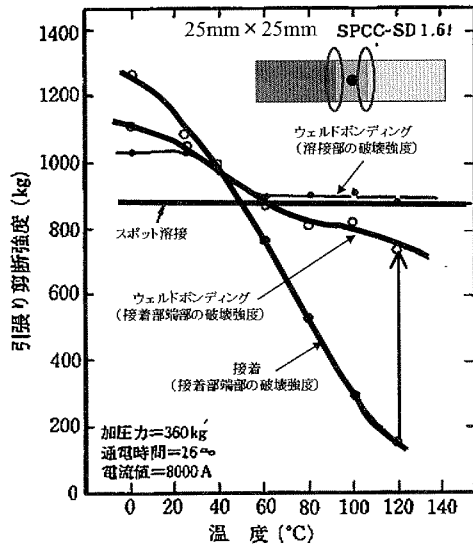


図12 スポット溶接併用による高温接着強度の向上

5. 設計基準

接着を汎用的な接合法として使用する際の設計基準は明確にされていないと述べたが、そもそも、「接着の実力強度」の考え方も明確ではない。初期強度や平均強度や破断強度で考えてはいけないことは自明である。また、接着強度のばらつきや劣化は当然考慮されるべきである。

そこで、接着部に要求される信頼度、接着強度のばらつき、接着強度の温度依存性、内部破壊、劣化を考慮して「接着の実力強度」を求めた<sup>9,10)</sup>。その結果、接着の実力強度は、接着部の使用温度範囲において最も強度が低下する温度での平均破断強度に対して、静荷重だけが加わる場合は1/10、ヒートサイクルなどの低サイクル疲労が加わる場合は1/11、高サイクル疲労が加わる場合は1/20であった。この接着の実力強度が設計基準強度に相当するものである。実際の設計に使用できる上限強度、即ち、設計許容

強度は設計基準強度を安全率で割った物となる。安全率を1.5倍、2.0倍とすると、設計許容強度は、静荷重だけが加わる場合はそれぞれ1/15、1/20、ヒートサイクルなどの低サイクル疲労が加わる場合は1/17、1/22、高サイクル疲労が加わる場合は1/30、1/40となる。

ただし、この設計基準を使用する前提は、初期の凝集破壊率が40%以上ある事、初期の変動係数が0.10以下まで作り込まれていることである。

6. おわりに

接着特性の信頼性と耐久性について述べた。耐用年数まで安心して使える信頼性に優れた製品を製造することは、企業及び技術者の基本的な社会的責任である。信頼性の高い製品は、地球環境保護の観点からも好ましい形である。接着の特性を向上させるには、接着剤のメーカーとユーザーの協力と歩み寄りによる作り込みが大切である。接着の欠点は他の方法でカバーするなど、接着接合の活用技術の向上に努力されたい。

参考文献

- 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, 43, 319 (2007).
- 3) 原賀康介, 日本接着学会誌, 40, 564 (2004).
- 4) 原賀康介, 接着の技術誌, 24(2), 58 (2004).
- 5) 原賀康介, 日本接着学会誌, 39, 448 (2003).
- 6) 原賀康介, 接着の技術誌, 16(2), 55 (1996).
- 7) 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, 106 (2013).
- 8) 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, 81 (2013).
- 9) 原賀康介, 日本接着学会第51回年次大会講演要旨集, 87 (2013).
- 10) 原賀康介, 日本接着学会誌, 50, 53 (2014).