

強度、耐久性、信頼性、品質、コストに優れた接着接合のための設計法とつくり込みの目標値

(株)原賀接着技術コンサルタント
<http://www.haraga-secchaku.info/>
 原賀康介

1. 接着接合の「特異性」と「品質のつくり込み」の重要性
2. 高品質確保のための必要最低限のつくり込みの条件
3. 品質つくり込みのための予備知識
4. ばらつき、劣化、内部破壊、安全率を考慮して接着部の必要強度、必要寸法、変動係数のつくり込み条件を簡易に求める 原賀式『Cv接着設計法』
5. 「品質」と「コスト」を両立させる複合接着接合法
6. 構造設計における耐久性のつくり込み
7. まとめ



1/25

1. 接着接合の「特異性」と「品質のつくり込み」の重要性

- ◆接着の特異性
 - ◇接着剤による接合は、主として分子間力による界面を有する結合であるため、ねじ・ボルト・ナット、リベット、溶接、ろう付けなどに比べて接合特性に影響する因子が多く、接合特性のばらつきが大きい。
 - ◇非破壊での強度検査は現在不可能であり、検査工程で低強度品を排除できないため、不良につながる低強度品もフィールドに流出する。
 - ◇継手の設計基準が不明確
- ◆それでも、量産品では、同じ性能のものを安定して製造しなければならず、1個しか作らないものでも、狙い通りの性能のものを検査なしで製造しなければならない。
- ◆このためには、開発段階で、材料設計、構造設計、プロセス設計、設備設計、信頼性設計と検証をとことん実施し、つくり込みのための最適値と許容範囲の決定(品質のつくり込み)を行うことが重要。
- ◆こういう点から、「接着接合」は「特殊工程」の技術、作業に区分されている。
 - ※「特殊工程」：結果が後工程で実施される検査および試験によって、要求された品質基準を満たしているかどうかを十分に検証することができない工程と定義。



HSC 2/25

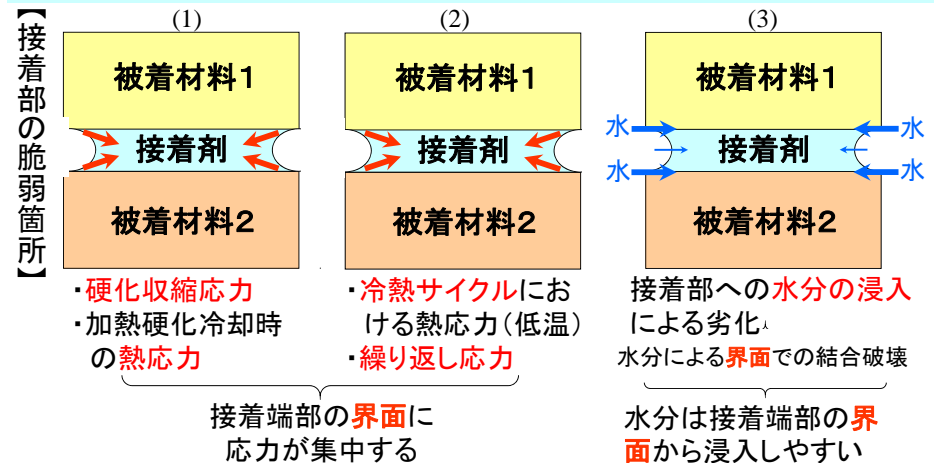
「信頼性」と「品質」、「コスト」

- ◆壊れなければ(不良が出なければ)それで良いのか？
 最大負荷条件以上の特性を持っていれば壊れない・・・「信頼性」はOK
- ◆しかし、「信頼性」が確保できていても、特性の「ばらつき」が大きければ「高品質」とは言えない。
- ◆「高品質」とは、壊れにくく(信頼性が高く)、かつ、「ばらつき」が小さいこと。
- ◆ただし、高信頼性化のためのコストアップは問題。
- ◆「高品質な製品を低コストで作る」ためには、次のような点を考えねばならない。
 - ・不良率・・・発生不良率と想定不良率(許容不良率)
 - ・接着部に加わる負荷の条件
 - ・接着特性の分布形態
 - ・許容できる特性の下限値と合格品のばらつきの大きさ
 - ・その他に、接着に関して考慮すべき点
 - ・設計許容強度をどう見積もるか・・・破断強度で見積もってはいけない
 - ・劣化による特性の低下・・・強度低下とばらつきの増加
 - ・劣化を低減する構造設計
 - ・壊れても安全なものを作る・・・破壊に対する冗長性の確保・・・複合接着接合法
 - ・コストを低減させる構造・プロセス設計・・・複合接着接合法
- ◆以下に、このような「品質・コストの作り込み」について述べる。

HSC 3/25

2. 高品質確保のための必要最低限のつくり込みの条件

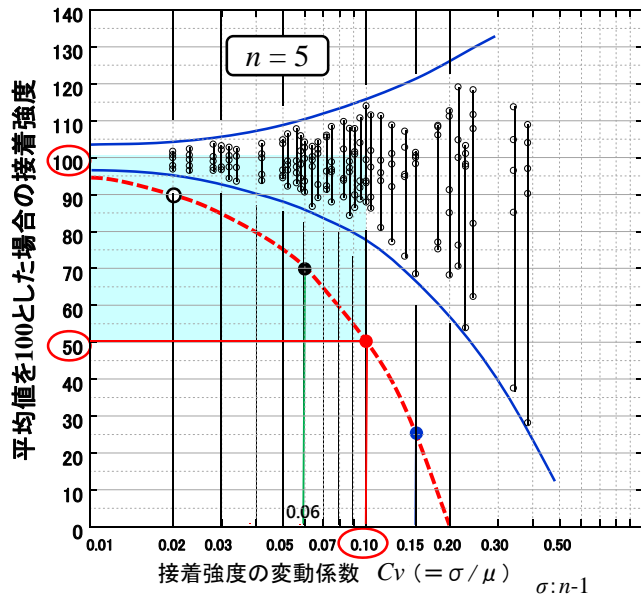
2.1 凝集破壊率40%以上を確保すること



- ◆接着部の脆弱箇所は接着端部の界面 → 界面破壊は禁物 → 界面での結合を強化して、凝集破壊に持って行くこと。
- ◆凝集破壊率は40%以上確保すること。←多数のデータより

HSC 4/25

2.2 ばらつきの指標 最低限、変動係数 $Cv \leq 0.10$ までつくり込む



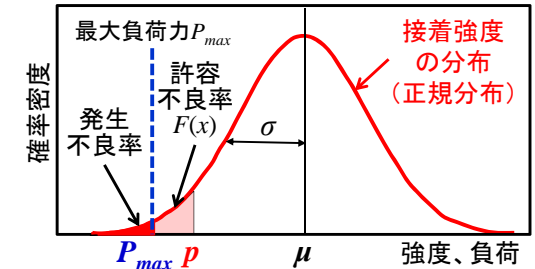
- ◆接着特性(強度)のばらつきの大きさは、変動係数 $Cv(=標準偏差\sigma/平均値\mu)$ で表す。
- ◆青線は、 $n=5$ のデータのばらつきの範囲と変動係数 Cv の関係である。
- ◆ n 数が多くなるほど最低値は低くなり、 $n=1000$ 万の場合、下から3番目のデータは赤破線のようにになる。
- ◆高品質というためには、低強度品といえども平均値の50%は確保されていることが必要である。このためには、変動係数 Cv は0.10以下が必要となる。

HSC 5/25

3. 品質つくり込みのための予備知識

3.1 分布の形、発生不良率、許容不良率

- ◆ばらつきや信頼性を統計的に扱うには、接着強度の分布は正規分布になっている必要がある。(試験片が伸びたり変形せずに凝集破壊する場合は、一般に正規分布となる。)
- ◆接着部の破壊は、接着部に加わる最大の力 P_{max} 以下のもの発生する。
- ◆許容不良率は、製品の耐用年数までに発生する不良率の許容できる上限値であり、一般に設計段階で設定される。1/10万~1/1000万に設定されることが多い。(分布全体の面積を1とした時の面積比)
- ◆許容不良率以上の不良を発生させないためには、許容不良率の上限強度 $p \geq$ 接着部に加わる最大の力 P_{max} でなければならない。

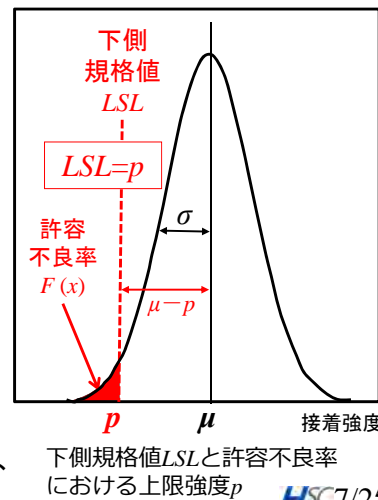


HSC 6/25

3.2 「工程能力指数 C_{pl} 」と「信頼性指数 R 」

- ◆品質管理において、非破壊で全数の検査ができる場合は、工程能力指数の下側規格値 LSL 以下の特性の物を検査工程で排除することができるが、接着強度は非破壊での検査はできないため、下側規格値 LSL 以下の強度のものを排除できず、市場に流れ出ることとなる。
- ◆この点から、接着強度においては、下側規格値 LSL は、検査の規格値としての意味はなく、市場に流出する不良品の割合を規定する規格値と考えるのが妥当である。
- ◆即ち、下側規格値 LSL は許容不良率 $F(x)$ の上限強度 p と同じ意味となる。
- ◆工程能力指数という言葉では工程管理の手法と誤解されやすいので、ここでは以下、工程能力指数 $C_{pl} = (\mu - LSL) / 3\sigma$ の考え方を借りて、「信頼性指数 R 」を(1)式のように定義する。

$$\text{信頼性指数 } R = (\mu - p) / 3\sigma \dots (1)$$
- ◆ $R=1.00, 1.33, 1.50, 1.67, 2.00$ などが使われるが、それぞれ許容不良率 $F(x)$ で表すと1.35/1000、3.17/10万、3.40/100万、2.87/1000万、1/10億に相当する。



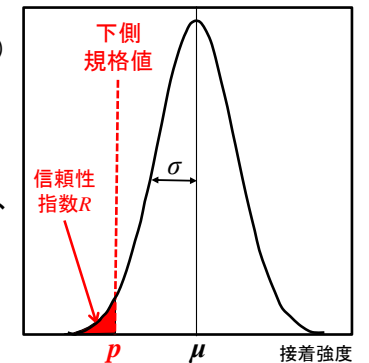
HSC 7/25

3.3 ばらつきの大きさを示す係数「ばらつき係数 d 」

- ◆信頼性指数 R の値は、許容不良率を表すもので、ばらつきの大きさ(分布のシャープさ)を示すものではない。
- ◆ばらつきの大きさは、平均値 μ と許容不良率の上限強度 p の関係で決まる。即ち、 p/μ が1.0に近いほど、ばらつきは小さく、分布はシャープになる。
- ◆そこで、 p/μ を「ばらつき係数 d 」と定義する。
- ◆ $\sigma = Cv \times \mu$ なので、(1)式は、 $R = (\mu - p) / 3\sigma = (1 - d) / 3Cv$ となり、

$$\text{ばらつき係数 } d = 1 - 3R \times \text{変動係数 } Cv \dots (2)$$
- ◆(2)式より、変動係数 Cv は、(3)式で表わされる。

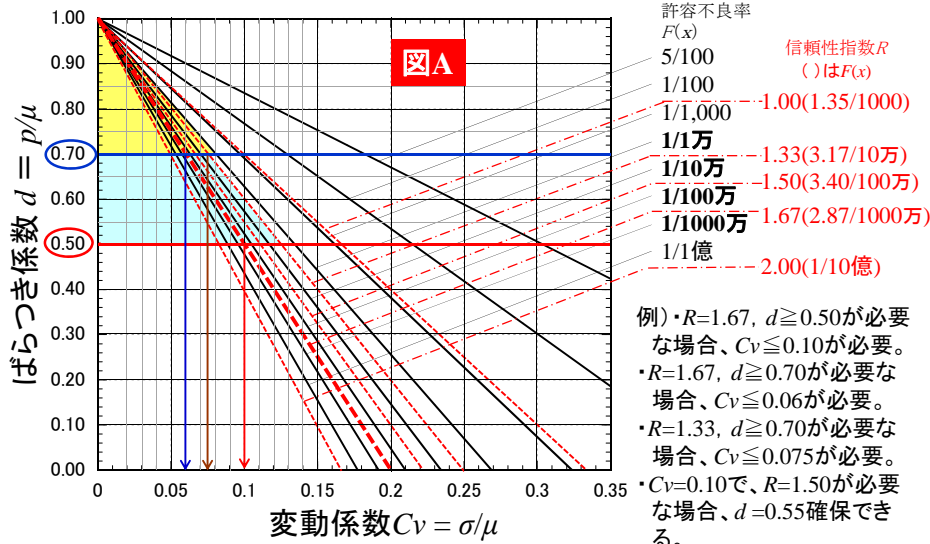
$$\text{変動係数 } Cv = (1 - \text{ばらつき係数 } d) / 3R \dots (3)$$
- ◆信頼性指数 R 、許容不良率 $F(x)$ 、ばらつき係数 d 、変動係数 Cv の関係をグラフ化すると次頁の図Aが得られる。



HSC 8/25

信頼性指数R, 許容不良率F(x)と
変動係数Cv, ばらつき係数d (=p/μ) の関係式と関係図

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



3.4 接着強度を破断強度で考えてはいけない(内部破壊強度)

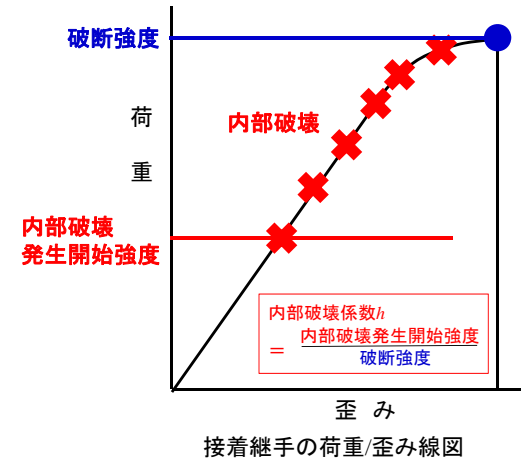
◆接着部の強度設計を行う時に、「破断強度」を用いて良いか？

⇒答えはNo 破断強度は真の接着強度ではない

金属では、耐力や降伏点、疲労強度などを材料強度と考える。

⇒では、接着ではどんな強度で考えれば良いのか？

⇒破断の前に起こる「内部破壊強度」で考える。



◆破断強度に対する内部破壊発生開始強度の比を「内部破壊係数h」と定義する。

内部破壊はどのくらいの荷重で生じるか—内部破壊係数h—

◆破断強度に対する内部破壊発生開始強度の比を「内部破壊係数h」として、次の場合を考える。

- ①静的荷重負荷の場合・・・ h_1
- ②繰返し疲労などの高サイクル繰返し負荷の場合・・・ h_2
- ③ヒートサイクルなどの低サイクル繰返し負荷の場合・・・ h_3

① 静的荷重負荷の場合

◆AEの結果より、凝集破壊では、破断荷重の50%以上の荷重で内部破壊が生じたので、内部破壊係数 h_1 はとりあえず $h_1 = 0.5$ と考える。

②③繰返し荷重負荷の場合

◆繰返し疲労試験の結果の一例を図に示す。ここでは、凝集破壊率70%の結果から内部破壊係数を求めている。

② 10^7 サイクルでの疲労強度は静強度の25%程度であるので、高サイクル疲労の内部破壊係数 h_2 は、 $h_2 = 0.25$ と考える

③ 10^4 サイクルでの疲労強度は静強度の45%程度であるので、ヒートサイクルなどの低サイクル疲労の内部破壊係数 h_3 は、 $h_3 = 0.45$ と考える

表. AEによる内部破壊の評価結果

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 %

AE発生開始荷重比=AE発生荷重/破断荷重

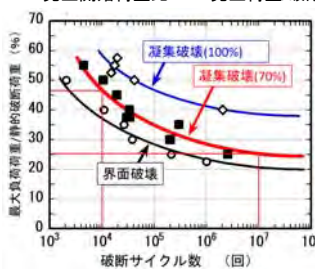


図. 疲労試験結果の一例

3.5 劣化すると接着強度の低下とばらつきの増大が起こる

◆劣化すると接着強度が低下する。
平均強度 $\mu_0 \rightarrow \mu_y$
保持率 $\eta_y = \mu_y / \mu_0$

・保持率 η_y は0.50以上は必要。

◆劣化するとばらつきが増大する。

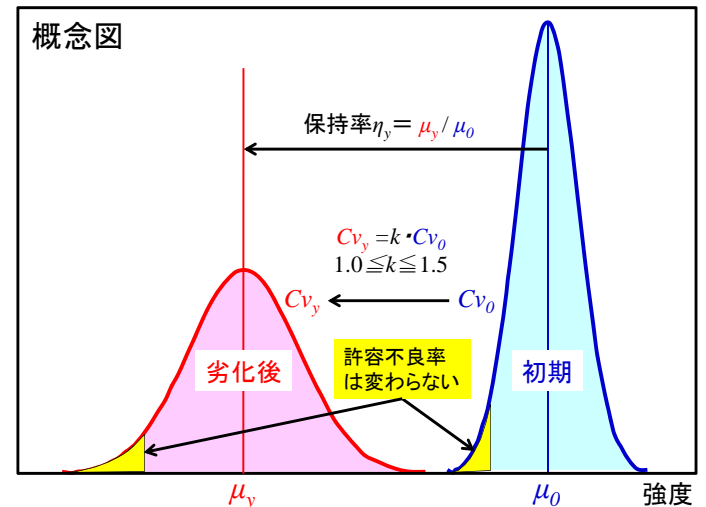
$Cv_0 \rightarrow Cv_y$

・ばらつきの増加は、変動係数が k 倍に増大すると考える。

$Cv_y = k \times Cv_0$

・変動係数の増加率 k は、経験的に、凝集破壊の場合は、1.5倍以下と考えれば良い。

◆劣化しても、設計段階で設定された信頼性係数(許容不良率)は変わらない。



4. ばらつき、劣化、内部破壊、安全率を考慮して接着部の必要強度、必要寸法、変動係数のつくり込み条件を簡易に求める

原賀式『Cv 接着設計法』による開発初期の見積り

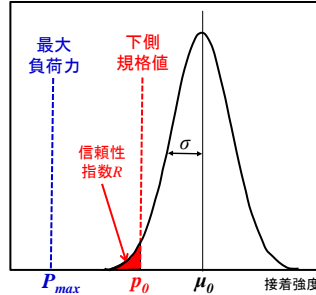
接着部に加わる最大負荷力が P_{max} で、品質要求として、

①信頼性指数 R (許容不良率) 信頼性指数 $R = (\mu - p) / 3\sigma \dots (1)$

②初期の平均破断強度 μ_{0hs} に対する下側規格値の強度 p_0 の割合 ($p_0/\mu_0 = d_0$) が規定されている場合に、

(a) ばらつき、劣化、内部破壊、安全率を考慮して、初期の平均破断強度 μ_{0hs} が最大負荷力 P_{max} の何倍以上になるように継手設計をすれば良いか？

(b) また、初期の変動係数 Cv_0 をどこまでつくり込む必要があるか？
を見積もる必要がある。



◆(a)は、(4)式より求まる。 $\mu_{0hs}/P_{max} \geq S / [h\{1-k(1-d_0)\}\eta_y] \dots (4)$

ここで、 S は安全率 ($S=1.5\sim 2.0$ 程度で良い)

◆(b)は、(3)式より求まる。 $Cv_0 \leq (1-d_0)/3R \dots (3)$

原賀式『Cv 接着設計法』による見積りの計算例

◆(a)信頼性指数 $R \geq 1.67$ の品質要求がある場合、安全率を含んだ初期の平均破断荷重 μ_{0hs} が、最大負荷力 P_{max} の何倍以上になるように継手設計をすれば良いかを (4)式で求める例

ここで、

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

安全率 $S=1.5$

内部破壊係数は、高サイクル繰返し疲労が加わる場合として $h_2=0.25$

劣化後の変動係数の増大率 $k=1.5$

ばらつき係数 $d_0=0.70$

耐用年数経過後の強度保持率 $\eta_y=0.50$

と仮定した場合、

(4)式で計算してみると、 $\mu_{0hs}/P_{max} \geq 21.8$ となる。

では、次のような場合に必要な接着面積を求めてみる。

・接着部に加わる最大力：せん断方向に20kgf(196N)

・使用する接着剤の、最高使用温度下でのせん断接着強度：9.0MPa

必要な接着面積は、 $196N \times 21.8 \text{倍} / 9.0N/mm^2 = 475mm^2$

よって、接着部の必要寸法は、例えば、 $20mm \times 25mm = 500mm^2$

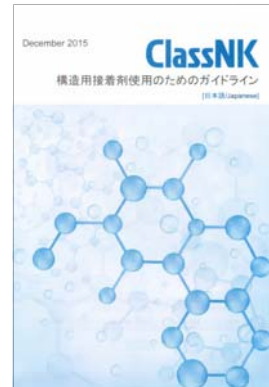
などとなる。

原賀式『Cv 接着設計法』による見積りの計算例(つづき)

◆(b)信頼性指数 $R \geq 1.67$ 、ばらつき係数 $d_0 \geq 0.70$ の品質要求がある場合、初期の変動係数をどこまで作り込む必要があるかを(3)式で求める例

$$Cv_0 \leq (1-d_0)/3R \dots (3) \quad (3) \text{式より、} Cv_0 \leq 0.06 \text{ となる。}$$

原賀式『Cv接着設計法』が、日本海事協会(ClassNK)の「構造用接着剤使用のためのガイドライン」(2015/12制定)に、設計許容強度の基準として採用されました



- ◆対象：造船における艀装工事
- ◆目的：造船現場における作業の合理化
作業環境の安全性向上
船舶の軽量化

◆このガイドラインでは、継手の必要な平均破断強度を、接着部に加わる力の40倍(即ち、 $\mu_{0hs}/P_{max} = 40$)と規定してある。

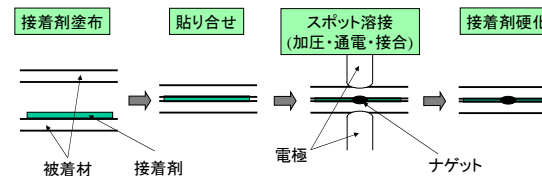
◆ガイドラインは、http://ship-densou.or.jp/hourei_kisoku/gl_use_of_structural_adhesives_j201512.pdfより入手可。

5. 「品質」と「コスト」を両立させる複合接着接合法

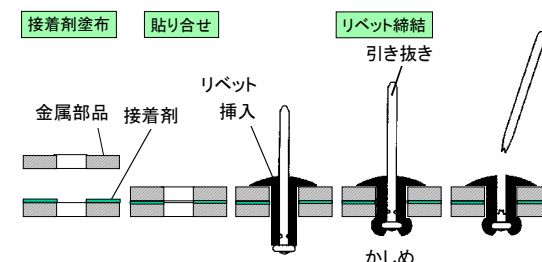
◆「複合接着接合法」とは、接着剤と他の接合方法を併用する接合法

5.1 代表的な複合接着接合法

(1) ウェルドボンディング・・・接着+スポット溶接



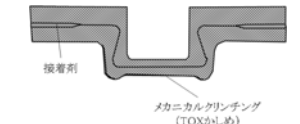
(2) リベットボンディング・・・接着+ファスナー



(3) 接着+セルフピアスリベット



(4) 接着+メカニカルクリンチング



(5) その他
かしめナット
セルフタップねじ
ねじ、ボルト・ナット
スタッドボルト

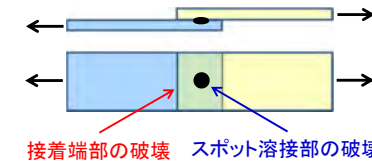
5.2 複合接着接合法による「品質」×「コストダウン」の効果

接着接合の欠点の解消・補完

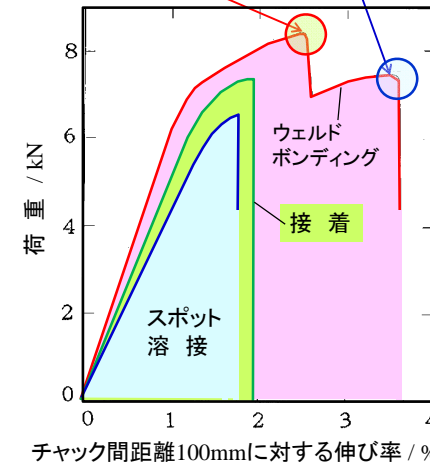
- ◆ 接着剤硬化までの**固定治具の代用**
 - 固定治具レス、待ち時間レス → コストダウン
- ◆ 容易で高精度な**位置合わせ** ← 穴などで位置が合う
 - 位置合せ治具不要、素人工化可能 → コストダウン
- ◆ **電氣的導通の確保** ← 接着の不足機能の補完
 - 電着塗装、アース、電磁シールド
- ◆ 高温（塗料焼付け時）での**はがれ、変形の防止**
- ◆ 接着接合の**性能向上**
 - ・ **クリープの防止** → 外部荷重の負荷、固定治具開放による部品のスプリングバック力など
 - ・ 高温での接着強度の向上
 - ・ 疲労特性向上
 - ・ 接着強度のばらつき低減
- ◆ 「想定外」への**対策（バックアップ）**
 - ・ **接着破壊に対する冗長性の確保** → 異常を発見し修理する余裕がある
 - **最低限の形状維持**：火災時の接着剤燃焼消失、異常な力での破壊
 - … 企業、技術者の最低限の社会的責任
 - … 笹子トンネル天井板崩落事故は防止できた

HSC17/25

破断に対する冗長性の確保



引張りせん断試験
幅25mm×ラップ25mm×厚さ1.6mm SPCC同士
接着剤：SGA（ハードロックC-370）
接着、スポット溶接、WBの比較



- ◆ 接合部の最も危険な破壊は、**瞬間的な分断**である。
- ◆ 接着剤による接合は、破壊によって一気に破断する傾向が強い。
- ◆ 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するが、破断には至らず、スポット溶接部で持ちこたえることができる。
- ◆ WBの破壊エネルギーは、接着やスポット溶接の約3倍に向上しており、**複合接着継手は破断に対する冗長性が高いことが分かる。**

HSC18/25

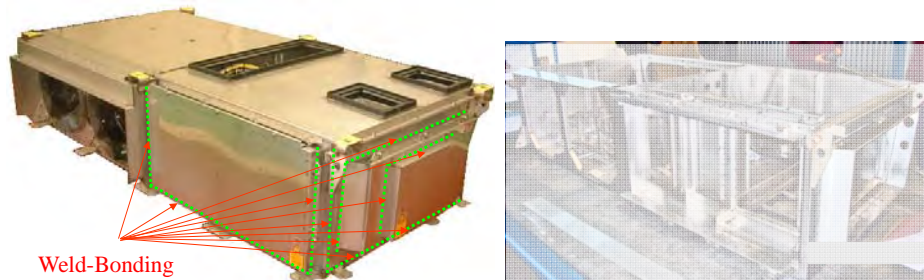
5.3 併用接着接合法の事例 — 高速列車用車両空調装置（WB） —

- ◆ 床下吊下げ型の空調装置の枠体（大きさ：約3m×2m×1m）は、軽量化のために、**薄いステンレス板を接着剤とスポット溶接の併用（Weld-Bonding）**で組立られている。
- ◆ 位置合せ治具や接着剤硬化までの圧締治具は使用していない。



- ◆ 高速列車用機器では軽量、高強度、高剛性、高耐久性（耐疲労特性、耐水性、耐薬品性など）、適正な価格であることが必要。

接着剤：二液室温硬化型アクリル系（SGA）



【車両空調装置の枠体】

HSC19/25

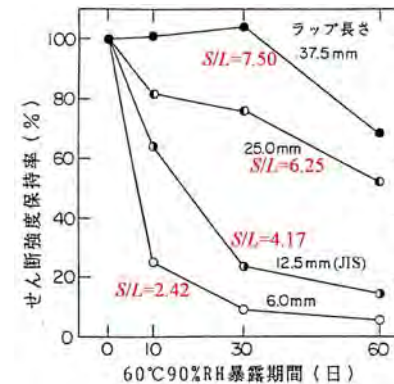
6. 構造設計における耐久性のつくり込み

6.1 耐久性のつくり込みによる継手設計の最適化

- ◆ 設計面で耐久性を向上させることによって、3.5の強度保持率 η_y を高くし、継手の必要強度倍率 μ_{0hS}/P_{max} を低下させることができる。

6.2 水での劣化に対する継手設計

- ◆ 耐水性や耐湿性は、接着部の寸法により変化する
 - 耐用年数、使用環境に合わせて、耐用年数経過後の劣化率を制御可能
 - 許容劣化率に合わせた寸法設計が可能



せん断試験片のラップ長を変化させた場合の耐湿性の違いの例

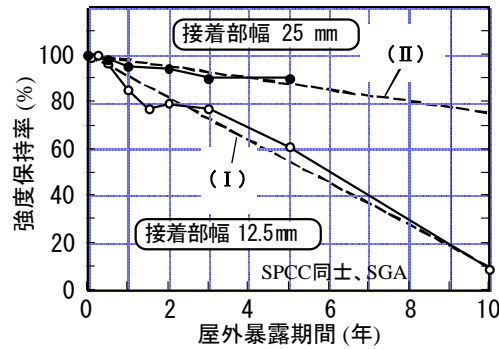
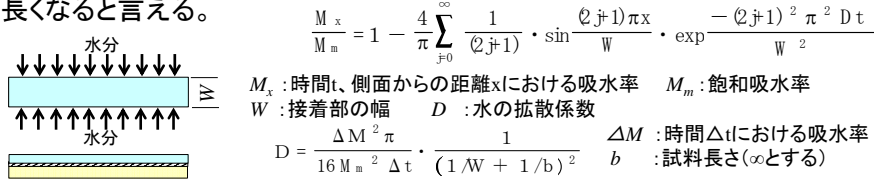
幅25mm、60°C90%RH、ステンレス、アクリル系接着剤

- ◆ 被着材が水分を通さない場合、水分は接着部の外周のみから浸入するので、**接着部の外周の長さLが短いほど、接着面積Sが大きいほど耐水性・耐湿性に優れる。**
- ◆ よって、**S/Lを大きくすることにより、耐水性・耐湿性を向上させることができる。**

HSC20/25

細長い接着部における接着部の幅Wと屋外暴露耐久性の例

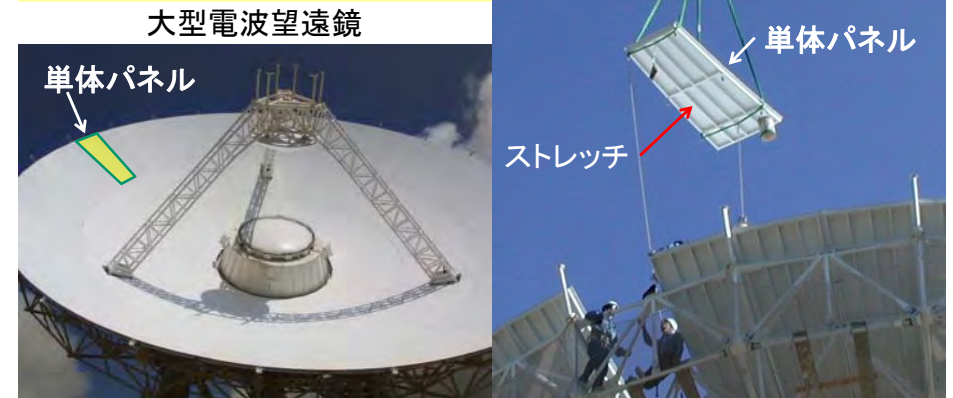
- ◆凝集破壊する系の場合、接着部への水分の浸入は、Fickの拡散の法則に従う。浸入した水分濃度は下式で計算できる。
- ◆この式より、同一保持率まで低下する時間は、接着部の幅Wの比の2乗で長くなると言える。



- ◆例えば、幅Wが2倍になれば劣化時間は4倍かかり、Wが3倍になると9倍の時間がかかる。
- ◆逆に、幅Wが1/2倍になれば1/4の時間で劣化を起こす。Wが1/3倍になると1/9の時間で劣化を起こす。

◆耐用年数経過後に、許容保持率になるように、試験片の幅から必要な幅を求めることができる。

耐水性確保のための補強部材(ストレッチ)の糊しろ設計の例

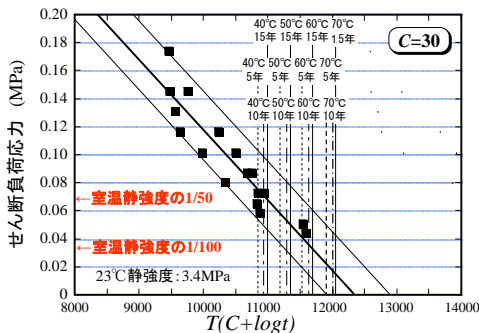


- ◆反射鏡: 口径20m、扇型の曲面単体パネル(約1m×3m)120枚で構成
- ◆分解能: 4台で月の上の1円玉が識別できる精度を有する
- ◆単体パネルの構造: 反射板の裏にストレッチ(補強材)が接着だけで固定
- ◆要求条件: ①鏡面精度: φ20m全体0.25mm以下、単体パネル0.15mm以下
②非塑性変形最大風速: 90m/sec (334km/hr)
※裏から風が当たると反射板を剥がす力が働く
③耐久性: 30年以上(屋外、耐水性・耐塩水性)

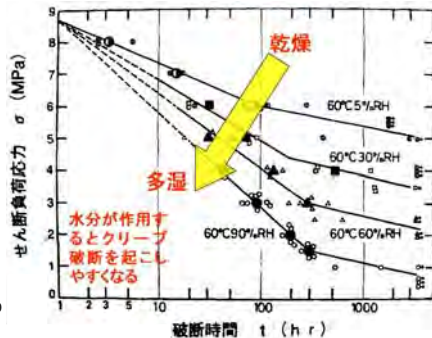
6.3 クリープの防止

- ◆クリープによる劣化や破壊は、接着にとって最も厳しい課題
- ◇弾性接着剤などの柔らかい接着剤では、室温平均破断強度の1/50~1/100のクリープ力でも破壊に至る。粘着剤はもちろん。
- ◇「クリープ+水分」の複合で劣化が加速する

変性シリコン系接着剤の Larson-Millerのクリープ破断特性



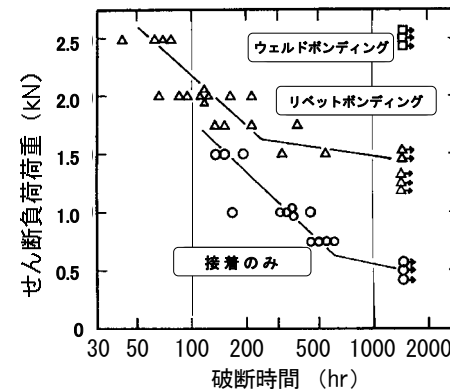
60°Cにおける相対湿度とクリープ破断時間(SGA)



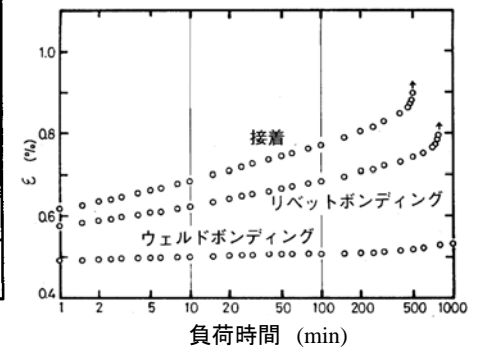
耐クリープ性の改善方法

- ◆接着部が重力を受けない構造: 例) 接着部品を底面まで延長する
- ◆複合接着接合法の採用

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破断特性の改善 (60°C90%RH雰囲気中、SGA)



接着、リベットボンディング、ウェルドボンディングにおけるクリープ変形率εの経時変化(60°C、SGA)



7. まとめ

強度、耐久性、信頼性、品質、コストに優れた設計を行うためには、

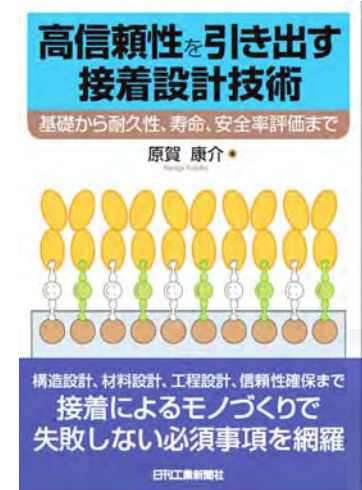
- (1) 界面での結合を強化して、凝集破壊にする。(凝集破壊率 $\geq 40\%$)
- (2) 接着強度の変動係数 C_v を0.10以下まで作り込む。
- (3) 破断強度を接着強度と考えて設計してはならない。
- (4) 劣化すると強度低下だけでなく、ばらつきが増大も起こることを考慮する。
- (5) 品質要求(信頼性指数 R 、初期のばらつき係数 d_0)を満足するためには、「継手の必要な平均破断強度」と「つくり込みに必要な初期の変動係数 C_{v0} 」は、それぞれ、原賀式「 C_v 接着設計法」の下式で求める。
 - ・継手の必要な初期平均破断強度 $\mu_{0HS}/P_{max} \geq S/[h\{1-k(1-d_0)\}\eta_y]$ …(4)
 - ・つくり込みに必要な初期の変動係数 $C_{v0} \leq (1-d_0)/3R$ …(3)
- (6) 品質とコストを両立させるためには、「複合接着接合法」を用いる。
- (7) 耐水性、耐湿性を向上させるには、「接着面積 S /接着部外周の長さ L 」をできるだけ大きく設計する。
細長い接着部の場合は、耐用年数経過後の必要保持率になるように、接着部の幅 W を設計する。

HSC 25/25

参考書籍のご紹介 NKガイドライン作成の参考資料にもなっています



著者 : 原賀康介
出版社 : 日刊工業新聞社
価格 : 2592円(消費税込)
発刊日 : 2013年1月29日



著者 : 原賀康介
出版社 : 日刊工業新聞社
価格 : 2808円(消費税込)
発刊日 : 2013年11月26日

内容詳細は、弊社ホームページ<http://www.haraga-secchaku.info/>に掲載してあります

参考書籍のご紹介 NKガイドライン作成の参考資料にもなっています



著者 : 原賀康介, 佐藤千明
出版社 : 日刊工業新聞社
価格 : 2700円(消費税込)
発刊日 : 2015年2月20日

目次

- 第1章 接着接合による車体軽量化への期待
- 第2章 接合法の種類
- 第3章 接着剤による接合・組立技術
- 第4章 自動車の材料多様化に対応する接着技術の課題
- 第5章 信頼性の高い接着接合を行うためのポイント
- 第6章 機能、生産性、コストを並立させる接着剤

内容詳細は、弊社ホームページ
<http://www.haraga-secchaku.info/>
に掲載してあります