

高品質接着への課題と試行錯誤からの脱却 ～接着工学的取組みの必要性～

株式会社 原賀接着技術コンサルタント 原賀康介

はじめに

日本の製品は、その「品質の高さ」で世界中に信頼されてきた。しかし、さまざまな不良の続出によって、この「品質」は危機に瀕している。^{1,2)} 「接着」の世界においては、これまで、「品質」にとって重要な「ばらつき」や「信頼性」についての議論や研究は多くはなされてこなかった。³⁻⁸⁾ これからの時代は、品質が企業の存亡を大きく左右する重要な鍵となる。接着接合においても、「品質」を重視していかなければ、さらなる適用拡大は図れず、また、接着を用いた製品は世界から見捨てられる事にもなりかねない。

ここでは、接着接合を製品に適用する際に行われてきた試行錯誤的開発から脱却し、世界が求める「担保された高品質」に応えていくために、何をやらなければならないのか、どうやれば良いのかについて演者の考えを述べる。

1. 高品質接着とは

「品質」とは顧客の満足度であり、「高品質」の条件としては、「信頼性の高さ(壊れにくさ)」と「ばらつきの小ささ」を兼ね備えていることが最低限必要である。「高品質接着」とは、接着特性に優れ、不良率が低く(信頼性に優れ)、接着特性のばらつきが小さく、耐久性に優れ、しかも、生産性に優れた接着である。

2. 日本の構造接着技術の現状

優れた強度や耐久性が要求される構造接着の技術レベルは、一部の機器メーカー先導型で、メーカーによる技術力の差が大きく、構造接着は溶接やボルト・ナットのような一般的な接合組立の要素技術にはなり得ていない。用いられる接着剤も海外品が多い。日本の構造接着技術が欧米に遅れた理由としては、構造接着技術を牽引する産業、すなわち航空機産業がなかったという点である。一方、日本には、造船という牽引役があったので、溶接や鉄鋼の技術は世界一になっている。牽引役がないため、技術開発のリソースも少なく、大学でも構造接着や接着工学的研究は多くは行われてこなかった。その結果、接着に詳しい技術者が育たず、構造接着を設計に活かそうという発想も貧弱となったといえよう。

企業において構造接着技術を製品に適用する現場での実態として、次のような状況がある。①構造接着適用の技術開発は機器製造メーカー主体で行わざるを得ず、適用までには膨大な評価・検証試験が必要なため、開発リソースが少ない企業では構造接着は適用できない、②機能・特性から接着剤

を選定する指針がないため、接着剤の選定は試行錯誤で、経験が少ない場合は泥沼に陥る、③汎用的な設計規格や基準、マニュアルなどもないため、試作・評価の繰り返しでの設計となり、設計の負荷増大、開発期限に間に合わないなどの問題が生じる、④接合部の SPEC から接着剤の物性への落とし込みができないため、接着剤の改良は試行錯誤的に実施され、改良品はその都度評価が必要、⑤耐久性、信頼性、品質をどう担保するのかまで手が回っていない、⑥接着工程での諸条件(表面処理など)の最適化には膨大な評価試験が必要なため、試行錯誤で決定するしかない。

これらの状況下で、接着の採用は極力避けたい、接着は他に方法がない時にしかたなく使うもの、設計者は他の接合方法を常に模索している、という状況に陥っているといえる。

3. 現状から脱却するためには

現状から脱却するためには、社内に接着技術に詳しい専門技術者を育成する、設計基準の整備などを急ぐ必要がある。しかし、これらのことを一企業で行う事は負担が大きく、遅ればせながらも、産官学連携で次のようなことを始める必要がある。①技術者教育(接着応用技術者育成講座)の実施、②資格認定制度(設計・生産・品質技術者、作業員)の構築、③機能からの接着剤選定システムの構築、④オーソライズされた形の設計指針・設計基準の作成と規格化、⑤接着工学的アプローチの強化、など。

しかし、接着には他の接合方法にはない下記のような「特異性」が多々あり、単純には行かない。

※接着の「特異性」：①界面を残した接合であり結合力に影響する因子が多すぎる、②液体による接合、③化学的材料による化学的接合、④物性面で不連続な接合、⑤非破壊検査が困難なため、検査工程で低強度品を排除できない、⑥劣化は、接着剤自体(バルク)より、界面でおこりやすい、⑦諸現象のメカニズムの解明が遅れている、⑧境界領域の技術で工学的体系化ができていない、など。

そこで、必要なのが「接着工学的取組み」である。「接着工学」とは、特性への影響諸因子を抽出し、各影響因子の影響メカニズムの解明と影響度の定量化を行い、因子間の相互作用を明確化・定量化・最適化することである。このためには、接着に関して分かっていない多くの現象を詳細に観察・解析し、地道にデータを蓄積していくことが必要である。

4. 構造接着研究会の重要性と今後の取組み(提案)

現在、接着工学的取組みをしている研究機関、学会はない。それを指向しているのは「構造接着研究会」であり、ここがリードしていくことがキーとなる。一気に活動を強化することは困難であろうが、次のようなことを一つ一つ着実に取組んでいく必要がある。①接着工学的アプローチの基本は、接着材料技術と接着適用技術の融合であり、企業(接着材料メーカーと機器組立メーカー)のシーズとニーズを学官の保有技術を多角的に活用・連携・融合させてマッチングを図る。このために、シーズ側及びニーズ側の会員増強を図る。②研究会に「接着質問コーナー」を設けて、ユーザーへのアドバイスとニーズ

の把握を行う。③接着ユーザーが最も困っている「要求機能からの接着剤の選定システム」の構築、④「接着応用技術者育成講座」の開催、⑤設計基準の作成、など。

おわりに

世界は、製品やソフト、システムに「高品質」の担保を求めており、接着においても「試行錯誤的高品質の達成」から「担保された高品質の創出」に変革していくことが、すでに「今」求められている。日本の構造接着が先進レベルに肩を並べられるよう、構造接着研究会、産官学の連携を図っていきたい。

参考文献

- 1) 日経ものづくり; “特集:バラつき対策待ったなし”, P.40-63. (2015年6月号).
- 2) 日経ものづくり; “特集:甦れ、日本の品質“, P.38-68. (2015年7月号).
- 3) 原賀康介; “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」”, 日本接着学会誌, Vol.51, No.6, P.200-205 (2015).
- 4) 原賀康介; “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”, 工業材料, Vol.63, No.6, P.25-29 (2015).
- 5) 原賀康介; “その接着! 工程能力指数 1.67 を満足できていますか? —接着の信頼性、品質、耐久性の考え方と作り込み:『CV接着設計法』—”, 第23回構造接着シンポジウム予稿集, P.17~24 (2014).
- 6) 原賀康介; “高信頼性接着の指針と設計基準”, 材料の科学と工学(日本材料科学会誌), Vol.51, No.2, P.59-62 (2014).
- 7) 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, P.101-106 (2014).
- 8) 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, P.53-58 (2014).

高品質接着への課題と試行錯誤からの脱却 ～接着工学的取組みの必要性～

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

1. 高品質接着とは
2. 日本の接着技術の現状
3. 現状から脱却するためには
4. 構造接着研究会の重要性と今後の取組み(提案)
5. まとめ



今、日本の「品質」は危機に貧している—品質が注目されている—

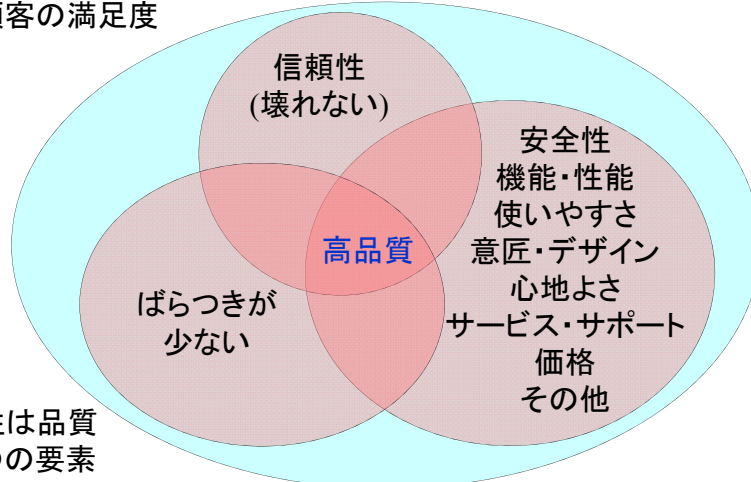


●接着も「品質」を担保できなければ、「置いてきぼり」されてしまう！

1. 高品質接着とは

高品質 = 信頼性の高さ × ばらつきの小ささ

品質 = 顧客の満足度



信頼性は品質の要素

高品質には、「信頼性の高さ(壊れにくさ)」と「ばらつきの小ささ」が両立していることが必要

「高品質接着」とは

- ◆接着特性(強度など)に優れ、
- ◆不良率が低く(信頼性に優れ)、
- ◆接着特性(強度など)のばらつきが小さく、
- ◆耐久性に優れ、
- ◆しかも、生産性に優れた接着を「高品質接着」と呼んでいる。

※「信頼性」は「品質」の一つの要素である

- ◆この中で、特に重要なのは、「ばらつきが小さいこと」である。

2. 日本の接着技術の現状

(1)産業分野別に見ると

- ・建築・土木分野 国内技術で問題ないレベル
- ・電子・光学・精密機器分野
機器は世界トップレベル 接着技術は企業差大
接着剤は海外品が多い
(国産接着剤で世界的定番商品は非常に少ない)
- ・構造接着分野 機器製造メーカーにより技術レベルはまちまち
一般に組立の要素技術になり得ていない
接着剤は欧米に比べて遅れている(海外品多い)
一部の機器メーカー先導型

(2)「構造接着技術」が欧米に比べて遅れた理由

- ・構造接着技術を牽引する産業(航空機産業)がなかった。
※一方、溶接や鉄鋼の技術が世界一になったのは、造船という牽引産業があったため
- ・日本接着学会も接着剤ユーザーのニーズに取組まなかった

「構造接着技術」が欧米に遅れた影響

- ◆構造接着技術を牽引する産業(航空機産業)がなかった。
 - ◆接着の技術開発にかけるリソース(人、金)が少ない
 - 日本の大学に「接着工学科」はない。学会もサロンに留まる
 - 日本では接着接合の技術者が育っていない、稀少
 - 機器製造メーカーでも接着の技術者は稀少
設計者から接着で組み立てるという発想が出てこない
- ◆日本では構造用接着剤の開発・製造には消極的(儲からない)
 - 接着剤メーカーに構造接着の適用技術(ソリューション)も育っていない
 - ※欧米の接着剤メーカーは ニーズを創成しながら材料(シーズ)を開発する
- ◆構造接着適用の技術開発は機器製造メーカー主体で行わざるを得ず、適用までには機器製造メーカーでの膨大な検証試験が必要(品質まで検証できている企業はわずか)
- ◆接着の設計規格や基準、マニュアルなども整備されていない
 - 開発リソースが少ない企業では構造接着は適用できない

「構造接着技術」を採用する現場での実態

- ◆構造接着適用の技術開発は機器製造メーカー主体で行わざるを得ず、適用までには機器製造メーカーでの膨大な評価・検証試験が必要
 - 開発リソースが少ない企業では構造接着は適用できない
- ◆どんな接着剤を用いれば良いのか?・・・機能・特性からの選定指針がない
 - ←試行錯誤で選定。経験が少ない場合は泥沼に入って迷走する
- ◆汎用的な接着の設計規格や基準、マニュアルなどもない!
 - ←外注できる接着設計会社などない。自社で設計が必要。設計の負荷増大。
 - ←試作、評価を繰返さざるを得ない。開発期限に間に合わない。
- ◆接合部のSPECから接着剤の物性への落とし込みができない
 - ←例)120℃でせん断20MPa確保するために必要な接着剤のヤング率は?
部材表面の面精度5μm(RMS)を確保するための接着剤の収縮率は?
←接着剤の組成配合設計は試行錯誤的に実施。試作品はその都度評価が必要。
- ◆耐久性、信頼性、品質をどう担保するのか?
 - ←勝手な加速評価試験で安心を得ている。試験片と製品の構造の違いは考慮されていない。信頼性、品質の評価まで手が回っていない。
- ◆接着工程での諸条件(表面処理など)の最適化が必要!
 - ←試行錯誤で決定。正確に決めるには膨大な評価試験が必要。
- ◆接着の採用は極力避けたい。接着は、他に方法がない時にしかたなく使うもの。
設計者は他の接合方法を常に模索している。

3. 現状から脱却するためには

- ◆社内に接着技術に詳しい専門技術者を育成する
 - ←簡単にはいかない ←社内に指導者はおらず、良い教科書もない
 - ←社外講習会の受講、コンサルタントへの委託
 - ←基礎知識を習得しても、応用・実践との格差が大きい
 - ←この格差を縮めるのは「経験とノウハウ」しかない。
 - ←基礎知識習得とOJT教育が必要
 - いずれにしても時間はかかる。(今、始める必要がある)
- ◆設計基準を整備する
 - ←他の接合の設計基準を流用 ←接着には「特異性」が多々あり流用困難
 - ←とりあえず、「原質式C_v接着設計法」や「耐用年数経過後の安全率の定量化法」などを用いてみる
- ◆遅ればせながらも、産官学連携で次のようなことを始めねばならない
 - ・技術者教育(接着応用技術者育成講座)の実施
 - ・日本版資格認定制度(設計・生産・品質技術者、作業者)の構築
 - 技術者資格認定、企業認証などISO制定で閉め出されてからでは手遅れ
 - ・機能からの接着剤選定システム(接着剤ソムリエ)の構築
 - ・オーソライズされた形の設計指針・設計基準の作成と規格化
 - ・接着工学的アプローチの強化 国の補助金なども活用
 - ・日本接着学会の改革 ← 構造接着研究会の活動強化

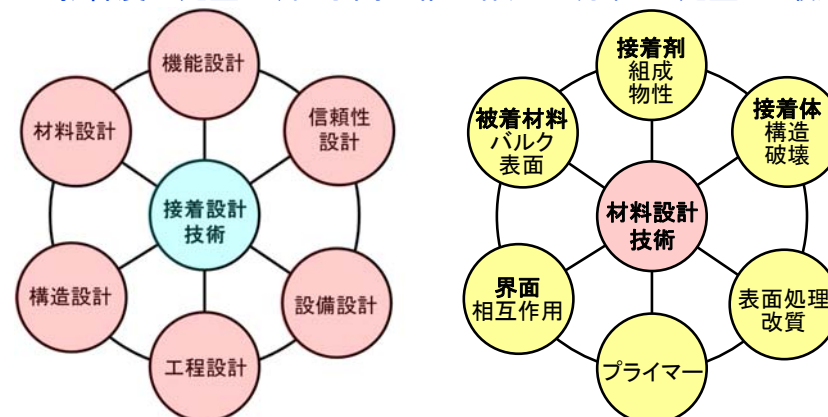
接着接合の特異性

- (1) **界面を残した接合**
→ 結合力に影響する**因子が多すぎる**
→ 他の接合法に比べて**強度のばらつきが大きい**
 - (2) **液体による接合**
 - (3) **化学的材料による化学的接合**
 - (4) **物性面で不連続な接合** (E, α, \dots)
← 最大の不連続箇所は**界面**
 - (5) **検査工程で低強度品を排除できない**
← 非破壊での強度検査ができない
→ 不良につながる**低強度品もフィールドに流出する**
 - (6) **劣化は、接着剤自体(バルク)より、界面でおこりやすい**
-
- (7) 諸現象のメカニズム解明の遅れ
例) 接着剤と被着材は界面でどう接合しているのか? その他後述
 - (8) **境界領域の技術**で**工学的体系化ができていない**

HSC9/21

接着工学とは

- ◆ **接着工学**：特性への影響諸因子の抽出、影響メカニズムの解明と影響度の定量化、因子間の相互作用の明確化・定量化・最適化



【接着設計技術とその要素技術】

【材料設計技術とその要素技術】

- ◆ 各要素技術は、相互に強く関連しており、それらの**強力な連携の元に接着技術は成り立つ**。(限定的要素技術の深掘りでは成り立たない)
- ◆ 強力な連携には、「**接着工学的アプローチ**」が必要

HSC10/21

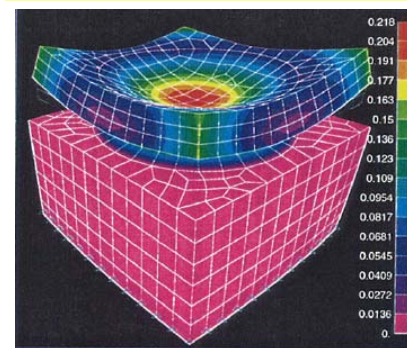
一例として、内部応力に関係する諸因子を考えてみる

内部応力で生じる不具合

- ◆ 部品の反りや変形
 - ◆ 意匠性、平面度の低下
 - ◆ 光学部品の歪み
- ◆ 精密部品の微小位置ずれ
- ◆ 磁気部品の出力低下
- ◆ 接着強度の低下
- ◆ 耐久性の低下

HSC11/21

接着剤の硬化収縮による光学ミラーの歪み



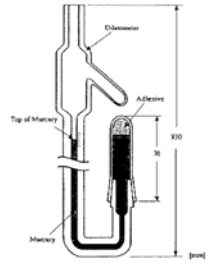
金属台座とガラスミラーを室温硬化型接着剤で接着した場合のミラーの変形状態
(丸穴スペーサーを介しての接着)

出典) K.HARUNA, K.HARAGA: "Finite Element Analysis for Internal Stress of Room Temperature Cured Adhesives.", Soc. of Manufacturing Engineers, AD97-207 (1997).

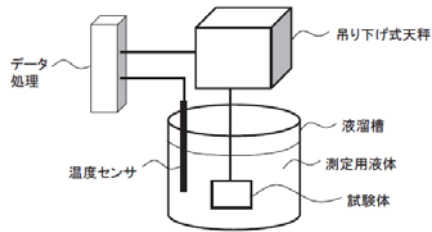
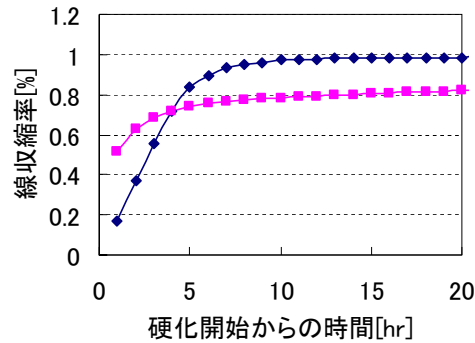
- ◆ ここでの影響因子は、
 - ① 接着剤の硬化収縮率 } 内部応力
 - ② 接着剤の弾性率
 - ③ 接着層の厚さ、形状、面積
 - ④ ミラー、台座の弾性率、厚さ(剛性)
 - ⑤ 接着層の拘束状態
 - ⑥ 温度変化 (α, E)
 - ◆ ただし、①②は硬化時間と共に変化するので、
 - ①は、①' 硬化収縮率の経時変化
 - ②は、②' 弾性率の経時変化
 - ◆ さらに、スペーサーによって厚さ方向に拘束されているので、
 - ⑦ 発生した内部応力による応力緩和
 - ⑧ 応力緩和に影響する硬化速度
- ※①', ②', ⑦, ⑧の評価法も必要

HSC12/21

①' 硬化収縮率の経時変化の測定法



【ディラトメーター法】

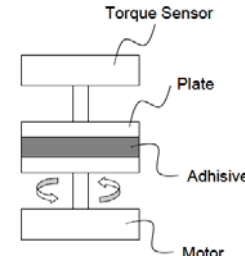


【アルキメデス法】

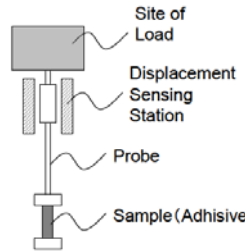
2種類のエポキシ系接着剤のアルキメデス法による硬化収縮率の経時変化の測定例

出典)長谷川,上山,原賀,廣井;"アルキメデス法を用いた硬化収縮量と収縮応力の評価法",第50回日本接着学会年次大会P32B(2012).

②' 弾性率の経時変化(液体→固体)の測定法



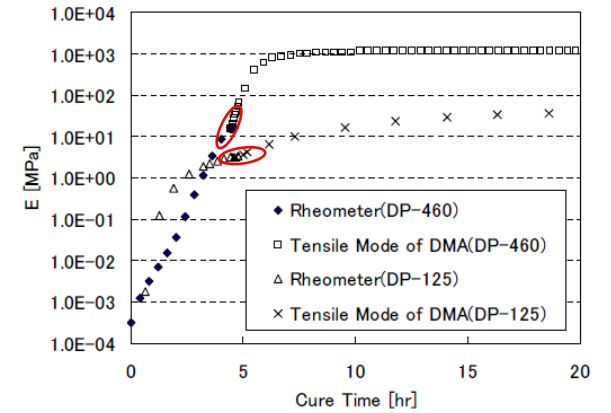
【レオメーター】



【DMA】

10MPaまでは、レオメーターを用いて円錐または並行円板で測定する

10MPa以上はパイブロンにより引張りで測定

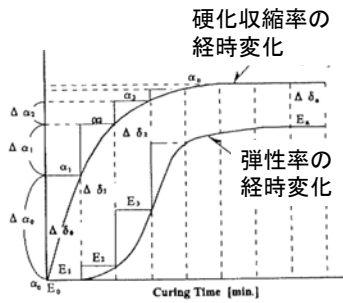


2種類のエポキシ系接着剤の弾性率の経時変化の測定例

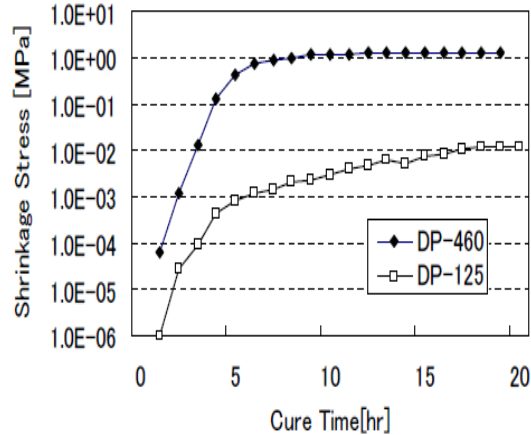
出典)長谷川,上山,原賀,廣井;"アルキメデス法を用いた硬化収縮量と収縮応力の評価法",第50回日本接着学会年次大会P32B(2012).

①', ②' から内部応力の経時変化の求め方

線収縮率と引張り弾性率の経時変化から、区分的線形解析を行う



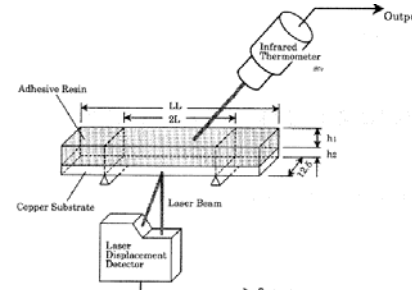
【区分的線形解析】



2種類のエポキシ系接着剤の硬化収縮応力の経時変化の計算例

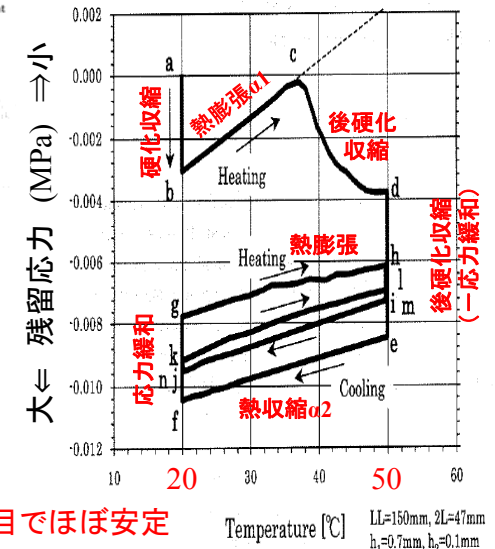
出典)長谷川,上山,原賀,廣井;"アルキメデス法を用いた硬化収縮量と収縮応力の評価法",第50回日本接着学会年次大会P32B(2012).

⑦ 硬化過程~H/Cにおける内部応力の発生と応力緩和の測定



【バイメタル法による二液室温硬化エポキシ系接着剤の変形測定】

ばね用焼青銅板(厚さ:100 μ m)
レーザー変位計で撓み測定
赤外線温度計で温度測定



※ヒートサイクル2サイクル目ではほぼ安定

Temperature [°C] LL=150mm, 2L=47mm, h₁=0.7mm, h₂=0.1mm

出典)春名一志,寺本和良,原賀康介,月館隆二;"エポキシ系接着剤硬化過程における残留応力発生挙動",日本接着学会誌, Vol.36, No.9, P.39 (2000).

まだまだ接着でわかっていないことは多い

- ◆種々の被着材料表面と各種の接着剤は**どういうふう**に結合しているのか？ ←ここが明確にならないと**劣化のメカニズム**は解明できない
- ◆**真の接着強度**はどうやって測定するのか？
破断試験は接着強度ではなく破壊強度の評価
設計に用いる**設計基準強度**はどう決めるのか？ 内部破壊、疲労強度
- ◆接着の**良否の判断基準**は強度か？ **凝集破壊率** > ばらつき > 強度
- ◆接着のばらつき(最低強度)を**統計的に扱うための最適な方法**は？
平均値は無意味
- ◆接着接合体の**疲労特性に、金属のような疲労限はあるのか？**
- ◆接着層が厚くなると、なぜせん断強度は低くなるのか？
- ◆ラップ長が長くなると破断強度が頭打ちになるのはなぜか？
これは定説だが、被着材の引張り強度の影響が大きい
ラップ端で応力が高くなると応力緩和が生じる

●諸現象の詳細な観察・解析と地道なデータの蓄積が必要

●接着工学的取組みにより徐々に解明しなければならない

HSC17/21

4. 構造接着研究会の重要性と今後の取組み(提案)

- ◆現在、接着工学的取組みをしている研究機関、学会はない。
それを指向しているのは「構造接着研究会」で、ここが活性化してリードしていくことがキーとなる。
- ◆**接着工学的アプローチの基本は、接着材料技術と接着適用技術の融合**
←企業(接着材料メーカーと機器組立メーカー)のシーズとニーズを学官の保有技術を多角的に活用・連携・融合させてマッチングを図る
- ◆このために、
 - ・**ニーズ側会員の増強**: 機器組立メーカー
 - ・**シーズ側会員の増強**: 接着材料(接着剤、プライマー、表面処理・改質、被着材料)メーカー
- ・研究会に「**接着質問コーナー**」を設けて、ユーザーが困っていること、知りたいことを掴む(メール、幹事・学会員らが回答)
- ・接着ユーザーが最も困っている「**要求機能からの接着剤の選定システム**」(WEB検索システム)の構築・・・分科会活動

HSC18/21

さらに、『担保された高品質接着』の“Global Standard化”への対応

- ◆DIN6701-2(鉄道車輛製造における接着施工) ⇒ **ISO化の動き**
事業所認証の条件
 - ・充分な適正資格を有する事業所であること。
 - ・**2名以上の接着施工監督責任者**がいること(設計・管理技術者)
 - ・**接着施工技術監督者**が必要資格を有していること(現場指導技術者)
 - ・**接着施工作業者**が充分な技術資格を有していること(作業員)
 - ・接着接合クラスに相応する「**設計上の証明**」がなされていること
- ◆将来、鉄道車両から多くの機器に拡大する可能性も否めない

●世界は『担保された高品質接着』を求めており、
『試行錯誤的な品質の担保』では通用しなくなる

- ◆「**接着応用技術者育成講座**」の開催・・・年間カリキュラムの作成から開始
- ◆**接着応用技術者の資格認定の早期JIS化**・・・他機関と連携、対象分野拡大
近い将来の「**企業認証制度の規格化(ISO)**」を視野に入れて
- ◆**設計基準の作成**

HSC19/21

中国ではすでにDIN6701-2認証の資格教育を実施している

培训时间: **全日制八周**授课, 正式授课时间**332小时**。教育、認証機関: **3機関**有り。
每周课程结束后进行一次**笔试**, 所有课程结束后, 进行一次**口试**。

第1期	高分子材料基礎	化学の基礎、高分子材料の性能、熱分析法(DSC, DMA, TGA, TMA)、材料の機械的性質、材料の機械的挙動モデル
第2期	接着剤	付加重合型、縮重合型、連鎖重合型、物理的固化接着剤、化学材料の分子量計算
第3期	材質と表面処理	プラスチックの性能と表面処理、金属材料と表面処理、表面の後処理、ガラスの接着、ガラス繊維強化プラスチックと接着、プラズマ表面処理技術
第4期	評価技術と品質管理	破壊試験、材料の劣化、加速劣化の方法、非破壊試験、健康/安全/環境保護および関連法規、品質保証と関連規格、DIN6701, DVS3310
第5期	接着設計	単軸/多軸の応力歪み解析とモデル、接着継手の構造設計の原則、プロセス設計、高弾性材料解析の理論と方法、低弾性材料解析の理論と方法、接着性能データと選定、継手寸法の決定、分析法と制限、不良の判定規準、継手設計審査
第6期	接着のメカニズムと表面の科学	界面間の相互作用、界面層での重合物の性能、材料の表面分析法と手段、濡れと表面の性能、接着のモデル、表面の品質保証と分析装置、走査型プローブ顕微鏡法、分光技術による表面分析、透過電子顕微鏡、応用計算化学、腐食、赤外およびラマン分光法、クロマトグラフィ
第7期	接着施工技术	レオロジー、手作業による接着剤の塗布、塗布装置、サイジング方法、統計管理、ロボットの原理、ロボットによる塗布、機械塗布におけるプログラミング
第8期	ハイブリッド接合、事例分析	構造的な接続、ボルト締結、セルフかしめ、リベット締結、セルフピアスリベット、溶接、ハイブリッド接合技術、接着事例分析、口頭試問の段取り

5. まとめ 『担保された高品質接着技術』を目指す研究会へ

