

## 《特集：接着接合技術の動向》

# 接着接合技術の動向 －特徴・機能・効果・種類と今後の展望

鈴木接着技術研究所 鈴木 靖昭

## 1. はじめに

最近は、航空機だけでなく、自動車の軽量化、スマートフォン、OA機器などの軽量化、低価格化、エレクトロニクス実装のために、金属、CFRP、セラミックス、および樹脂など多くの異種材料の接着・接合技術が要求され、多様な接合技術が開発されている。

ここでは、先ず接着接合の原理を解説する<sup>(1)(2)</sup>。最近の接着剤を用いない異種材料接合法<sup>(1)(2)</sup>すなわち、湿式エッチングまたはレーザー処理により被着材表面に微細な凹凸を生じさせ、そこへ樹脂を直接射出成形する方法、レーザー光照射、被着材金属の摩擦、高周波、超音波、熱板などにより接合界面付近の樹脂を溶融して接合する方法などの接合原理も、溶融した樹脂が接着剤の役割を果たすため、接着接合の原理と同一である。

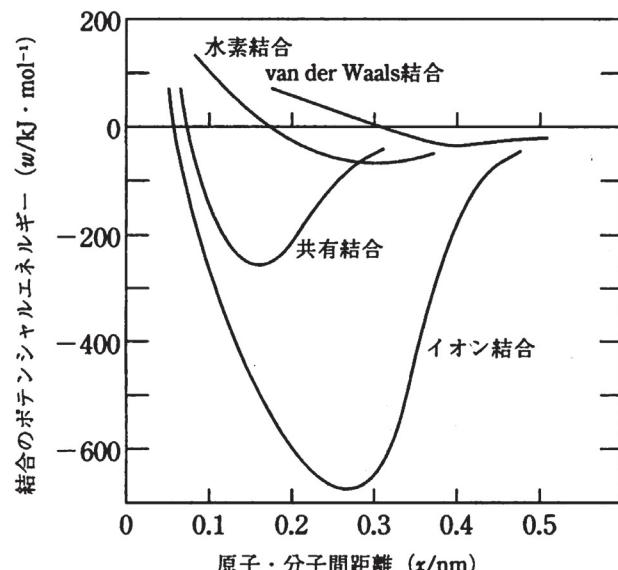
次いで、接着接合の長所と短所、接着接合部の応力分布、破壊条件、環境条件と耐久性、リベットなど他の接合法との併用の効果について述べるとともに、建築設備関連における接着接合技術の可能性についても展望する。

## 2. 接着接合の原理<sup>(1)(2)</sup>

### 2-1 化学的接着説（原子・分子間引力発生のメカニズム）

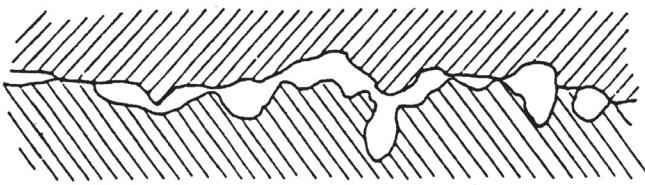
緊密に接触した界面において、原子間および分子間の引力相互作用により接着するという説である。これらの引力は、イオン結合、共有結合などの一次結合、水素結合、およびvan der

Waals結合に分類され、第1図にそれらの結合のポテンシャルエネルギーと原子・分子間距離との関係を示す<sup>(3)(4)</sup>。いずれの結合も、原子・分子間距離がおよそ0.6nm以下に接近しないと生じない。

第1図 化学結合のポテンシャルエネルギー<sup>(3)(4)</sup>

水素結合エネルギーは共有結合の場合のおよそ数分の1～十分の1、van der Waals結合エネルギーは水素結合の半分～十分の1程度である。

第1図に見られるように、原子・分子間引力が生じるためには、その間の距離を0.2～0.6nmにする必要があるが、被着材表面は、第2図のようにたとえ同一材料の破断面同士であってもnmオーダーよりはるかに大きな隙間が生じているため<sup>(5)</sup>、液体状接着剤あるいは溶融した樹

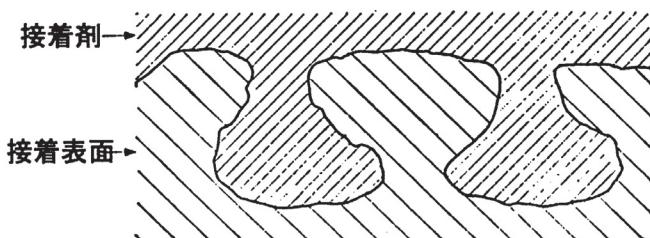
第2図 被着体表面間接触模型<sup>(5)</sup>

脂を隙間に充填し、被接合材表面との間隔を0.6nm以下とした後固体化し、分子間引力を生じさせる必要がある。

金属の表面には、生じた酸化物が空気中の水分と反応してOH基が多数生成しているため、エポキシ系接着剤などのOH基を有する接着剤が水素結合により大きな接着力を発生させる。

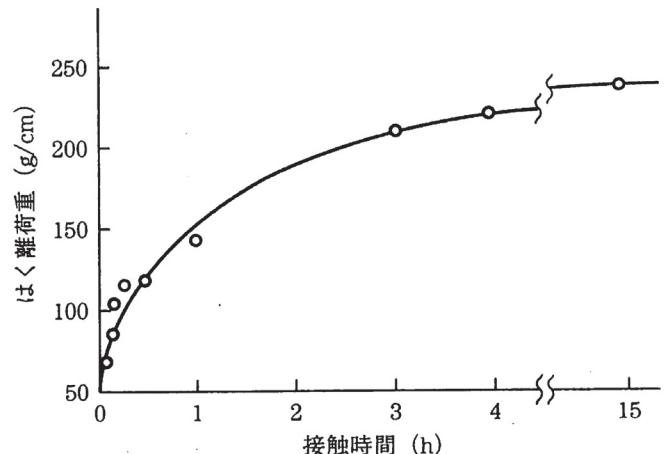
## 2-2 機械的接合説

第3図のように被着材表面に凹凸が多いければ<sup>(6)</sup>、そのくぼみ内へ接着剤が入り込み、錨を打ち込んだような効果（投錨効果、アンカー効果）が生じるとともに、接着面積も増加して、接着力が増すというよく知られた説である。アンカー効果は、接着強度の向上だけでなく接合部の環境耐久性向上に対しても重要であり後述する。

第3図 投錨効果（アンカー効果）<sup>(6)</sup>

## 2-3 からみ合いおよび分子拡散説・

Voyutskii が提唱したのが拡散説<sup>(7)(8)</sup>で、未加硫ゴムを重ね合わせておくとくっつくという現象を指している。第4図は、ポリイソブチレン同士を接触させたときの経過時間とはく離荷重との関係で、時間とともにはく離強度が大きくなることを示している<sup>(7)(8)</sup>。また圧力が高いほどはく離強度が大きくなることが明らかにされている。

第4図 ポリイソブチレンの接触時間とはく離強さとの関係<sup>(7)(8)</sup>

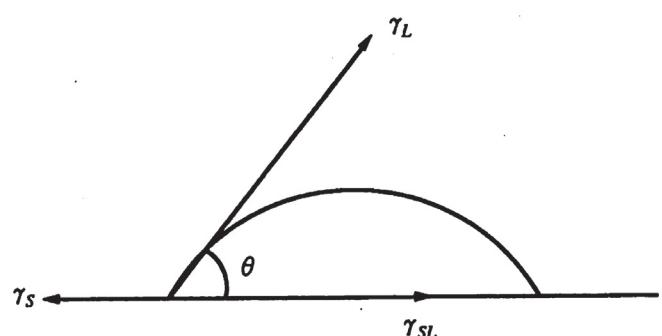
## 2-4 接着仕事と接着強度との関係

接着力発現の原理として、接着仕事の概念がある。すなわち、第5図において、表面自由エネルギー（表面張力）が $\gamma_s$ の固体の表面上に表面張力 $\gamma_L$ の液体の一滴を載せた時、両者の界面の界面張力を $\gamma_{SL}$ とする。液滴端の固体表面とのなす角（接触角）を $\theta$ とすれば、

$$\gamma_s = \gamma_{SL} + \gamma_L \cos\theta \quad \cdots \text{Youngの式(1)}$$

接着仕事を $W_a$ とすれば、

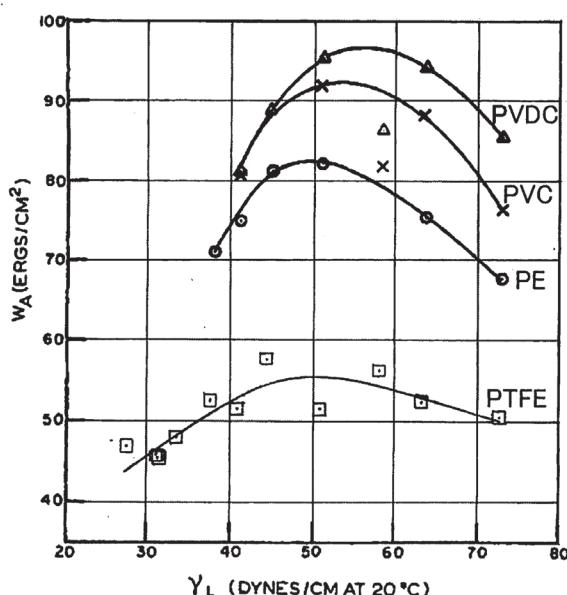
$$W_a = \gamma_s + \gamma_L - \gamma_{SL} = \gamma_L (1 + \cos\theta) \quad \cdots \text{Dupréの式およびYoung-Dupréの式(2)}$$



第5図 液滴の接触角

となる。式(2)により、接触角 $\theta$ が小さいほど被着材は接着剤により濡れやすく、接着仕事 $W_a$ が大きくなり、それにともなって接着強度が大きくなるものと考えられる。

第6図は4種類の高分子に対する、種々の表面張力をもつた液体の接触角 $\theta$ の実験値から式

第6図 種々の表面張力の液体に関する高分子の接着仕事  $W_a^{(9)}$ 

(2)のYoung-Dupréの式により得られた接着仕事  $W_a$  の計算値<sup>(9)</sup>であり、放物線状となっている。

第1表には、鋼、PVC、PEおよびPTFEをエポキシ系接着剤 ( $\gamma_L = 50 \text{ mJ/m}^2$ ) により接着した場合の接着仕事  $W_a$  を示す<sup>(2)</sup>。  $W_a$  の値は、鋼については拡張Fowkesの式による  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  およびエポキシ樹脂の表面自由エネルギーを用いた計算値<sup>(10)</sup>、その他の樹脂については、第6図においてエポキシ樹脂の  $\gamma_L = 50 \text{ mJ/m}^2$  に対する値である。

また、第1図から、接着部を1nm引き離せば破壊すると考えられるので<sup>(11)</sup>、第1表には、その時の平均応力 =  $W_a/1\text{nm}$  を接着強度計算値（理想値）として示すとともに、各継手の接着

強度実測値例および実測値例／計算値の値を示した。

実測値例／計算値の値は、鋼の継手の場合  $1/10 \sim 1/20$  となっており、他の継手においても被着材の  $\gamma_s$  と接着剤の  $\gamma_L (50 \text{ mJ/m}^2)$  との差が大きくなるほどその値が小さく、 $1/18 \sim 1/110$  となっている。

これらの相違の理由は、2原子面間の分離に要する仕事から求めた理想的べき開破壊強度（ヤング率Eの約  $1/10$ ）に対し、材料の実際の引張強度が、そのおよそ  $1/100 \sim 1/10$  である<sup>(12)</sup>ことと同様に、接着部に存在する微細な欠陥、亀裂、ボイド等の存在によるもの、すなわち強度の組織敏感性<sup>(13)</sup>によるものと考えられる。

第1表において、PEおよびPTFEの接着強度の実測値と計算値の比が、 $1/38$  および  $1/110$  と小さかったのは、両者の  $\gamma_c$  が  $31$  および  $18.5 (\text{dyn/cm})$  とエポキシ接着剤の  $\gamma_L = 50 (\text{dyn/cm})$  との差が大きいため接着剤が被着材を十分濡らさない（接着剤が被着材の微細な凹部まで浸入できない）こと、次項で述べるように表面張力と相関があるSP値については差が開くと相溶性が悪くなり接着強度が小さくなるという結果が得られていること、および両被着材樹脂が結晶性で接着性が悪いこと（次節参照）によるものと考えられる。

## 2-5 溶解度パラメーターと接着強度との関係

物質の単位体積当たりの凝集エネルギーすなわち凝集エネルギー密度CED (cal/cm<sup>3</sup>) は、

第1表 接着仕事  $W_a$  から計算される接着強度と実際の接着強度との比較<sup>(2)</sup>

被着材	$\gamma_c$	$\gamma_s$	接着仕事 $W_a$	接着強度 MPa		接着強度 実測値例／計算値
	mJ/m <sup>2</sup>	mJ/m <sup>2</sup>	mJ/m <sup>2</sup>	計算値	実測値例	
鋼( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	—	1,357.0	291	291	15~30	$1/20 \sim 1/10$
PVC	39	44.0	92	92	5.1	$1/18$
PE	31	35.6	83	83	2.2	$1/38$
PTFE	18.5	21.5	55	55	0.5	$1/110$

注1. 接着剤: エポキシ系,  $\gamma_L = 50 \text{ mJ/m}^2$  とする。

注2. 接着強度計算値: 接着部を1nm引離すことにより破壊すると仮定した時の平均応力。

注3. 鋼( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )の場合の接着仕事  $W_a$  は、拡張Fowkesの式による計算値。

次式で表わされる<sup>(14)</sup>。

$$CED = (\Delta H - RT) / V \quad \cdots(3)$$

ここで、 $\Delta H$ ：蒸発潜熱、 $T$ ：絶対温度、 $V$ ：その温度における1モルの容積、 $R$ ：気体定数(1.982cal/K·mol)である。

HildebrandはCEDの平方根を溶解度パラメーター(SP値)と名付け<sup>(15)</sup>、記号 $\delta$ で表わした。

SP値が近い物質どうしは混合しやすいといわれるが、それは以下の理由による<sup>(14)</sup>。

液体1と液体2を混合した時のエンタルピー変化量を $\Delta H$ 、液体1、液体2、および混合後のエンタルピーをそれぞれ $H_1$ 、 $H_2$ 、および $H_{12}$ とすれば、

$$\Delta H = H_{12} - (H_1 + H_2) = V(\delta_1 - \delta_2)^2 \phi_1 \phi_2 \quad \cdots(4)$$

ここで、 $\phi_1$ および $\phi_2$ は液体1および液体2の容積の割合( $\phi_1 + \phi_2 = 1$ )、 $V$ は混合後の液体の容積である。

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad \cdots(5)$$

自由エネルギー変化 $\Delta G$ は負の値でなければ液体同士が混合するという変化が進行しない。混合によるエントロピー変化 $\Delta S$ は常に正の値であり、 $-T\Delta S$ の値は常に負であるから、両液体の混合が十分に進むためには、 $\Delta H$ ができるだけ小さくなり、 $\Delta G$ の絶対値ができるだけ大きくなることが望ましい。 $\Delta H$ ができるだけ小さくなるためには、式(4)から、液体1と液体2のSP値ができるだけ近いことが要求される。固体と液体の間でも同様のことがいえる。

第2表 各種高分子物質のSP値<sup>(16)</sup>

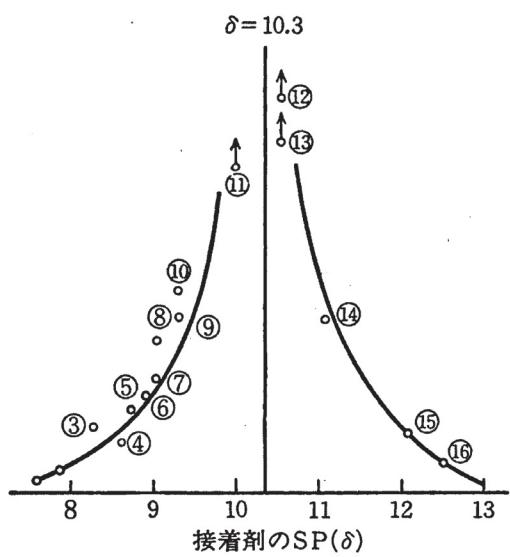
分類	結晶性	極性	ポリマー	SP	接着方法		
					融着	溶剤	極性接着剤
熱可塑	結晶	無極性 ↑ ↓ 極性	テフロン	6.2	○	×	×
			ポリエチレン	7.9	○	×	×
			ポリプロピレン	8.0 <sup>*1</sup>	○	×	×
			ポリオキシメチレン	9.5 <sup>*2</sup>	○	×	○
			ポリ塩化ビニル <sup>*3</sup>	9.5～9.7	○	○	○
		極性	ポリカーボネート <sup>*3</sup>	9.7 <sup>*2</sup>	○	○	○
			ポリエスチル	10.7	○	○	○
			ポリ塩化ビニリデン	12.2	○	○	○
			ナイロン	12.7～13.6	○	○	○
			ポリアクリロニトリル	15.4	○	○	○
			ポリビニルアルコール	23.4 <sup>*2</sup>	○	○	○
熱可塑	無定形	無極性 ↑ ↓ 極性	ポリスチレン	8.6～9.7	○	○	○
			ポリメチルメタクリレート	9.0～9.5	○	○	○
			ポリ酢酸ビニル	9.4	○	○	-
		極性	ポリ(酢ビニル)	10.4	○	○	○
			エチルセルロース	10.3	○	○	○
			酢酸セルロース	10.9	○	○	○
			硝酸セルロース	10.6～11.5	×	○	○
熱硬化	無定形	無極性 ↑ ↓ 極性	シリコーン	7.3	×	×	×
			ユリヤ、メラミン	9.6～10.1	×	×	○
			エポキシ	9.7～10.9	×	×	○
			フェノール	11.5	×	×	○
ゴム	無定形	無極性 ↑ ↓ 極性	シリコーン	7.3			
			ブチルゴム	7.7			
			天然ゴム	7.9～8.3			
			SBR	8.1～8.5			
			イソブチレン	8.0			
		極性	ブタジエン	8.6 <sup>*2</sup>			
			チオコール	9.0～9.4			
			ネオブレン	9.2			
			ニトリルゴム	9.4～9.5			

\*1 中尾計算 \*2 化学便覧、(公社)日本化学会、p.1248.

その他はすべてI. Skeist, "Handbook of Adhesives", p.11.

\*3 現在では、無定形樹脂に分類されている

第2表には各種高分子物質のSP値<sup>(16)</sup>を示す。Iyengerらは、第7図のように、マイラーシート(PETフィルム、急冷により非晶質、SP値:10.3)を種々のSP値の接着剤により接着したとき、はく離強度が接着剤のSP値=10.3で最大値を示すという実験結果を得ており<sup>(17)</sup>、接着剤の選定にあたり式(4)および式(5)の有効性が示された。



(マイラーの SP は 10.3) ③④などは接着剤の種類, δ は接着剤層破断

第7図 マイラー・シートのはく離接着強さと接着剤のSP値との関係<sup>(17)</sup>

一方、結晶性材料が液体に溶解する条件は、結晶が融解して非結晶になる時のエネルギー $\Delta H_m$ を式(5)に加えた次式、

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S + \Delta H_m \quad \dots(6)$$

で考えなければならない<sup>(18)</sup>。

融解熱はかなり大きな正の値であり、PE、PPのほか、エンジニアリングプラスチックの

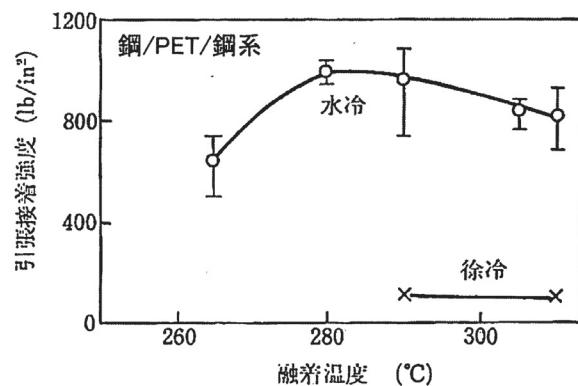
PEEK、PPS、PBN、PET、PBT、POM、PA、PTFE、ポリイミドなどが一般的に接着しにくいといわれるのは、これらが結晶性樹脂であり、溶解性を式(6)により考えなければならないためである。

これらの結晶性樹脂を接着するためには、コロナ放電処理、プラズマ処理、UV／オゾン処理などの方法で樹脂の表面をかなりの程度まで酸化して、アミド基、カルボニル基、カルボキシル基などの極性基(官能基)を生成させること(改質)が必要である。

第3表には、種々のプラスチックの結晶化度を示す<sup>(19)</sup>。結晶化度100%の樹脂はないので、結晶性樹脂でもある程度の接着性は示す。

また、結晶性熱可塑性樹脂の接着性が劣ることをカバーする方法として、最近の異種材料接合法<sup>(1)(2)</sup>、すなわちエッティングまたはレーザー光照射により金属または樹脂の被着材表面に微細凹凸を形成して実接着面積を増加させ、そこへ樹脂を射出成形または他方の被着材樹脂表面にレーザー光を照射し溶着させる方法がある。

なお、第8図はPETフィルムを用いて鋼を



第8図 PETの溶融接着強度に対する急冷(水冷)の効果<sup>(20)</sup>

第3表 種々のプラスチックの結晶化度<sup>(19)</sup>

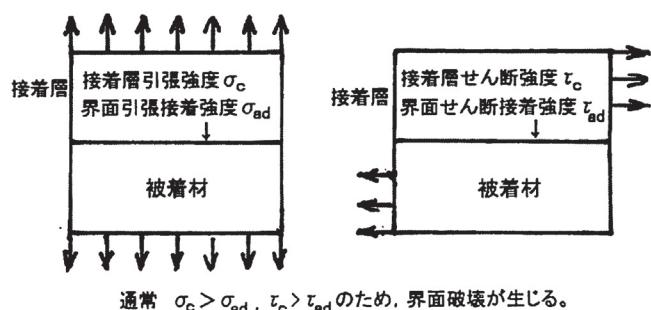
0	10	20	30	40	50	60	70	80
SBR	PF	EC	PVC	PS	PE	PA(ポリアミド)	POM(ポリアセタール)	
NBR	(フェノール樹脂)	(エチルセルロース)		PC(ポリカーボネート)		PET(ポリエチレンテレフタレート)		
IIR (ブチルゴム)	EP(エポキシ樹脂)					PAR(ポリアリレート)		
	PMMA					PVDF(ポリフッ化ビニリデン)		
	PS					PTFE(フッ素樹脂)		
(SBR, スチレンブタジエンゴム, NBR: ニトリルゴム)								

溶融接着した場合の接着強度であるが、急冷により結晶化が妨げられて大きな接着強度を示している<sup>20</sup>。しかし、この引張接着強度は110℃の熱処理（アニール）により急速に低下するという結果が得られており<sup>20</sup>、これは加熱による結晶化度の増加によるものと考えられ、注意が必要である。

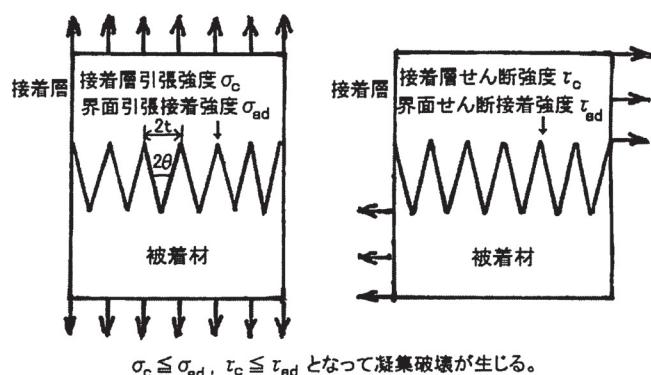
なお、両被着材とも熱可塑性樹脂である場合、両者のSP値が接近していれば、加熱溶融時に式(5)に基づいて2-3節のからみ合いおよび分子拡散が生じて接合するため、結晶性樹脂の場合でも式(6)を考慮する必要がない<sup>(1)(2)</sup>。

## 2-6 被着材表面への微細凹凸形成による接着強度向上の効果

接着強度は、主として第1図のvan der Waals結合および水素結合により発現するものであり、これは接着剤分子を構成する共有結合より小さいため、第9図(a)のように被着材表面が全く平坦であれば、接着層に引張荷重が加わった場合



(a) 被着材表面が全く平坦な場合

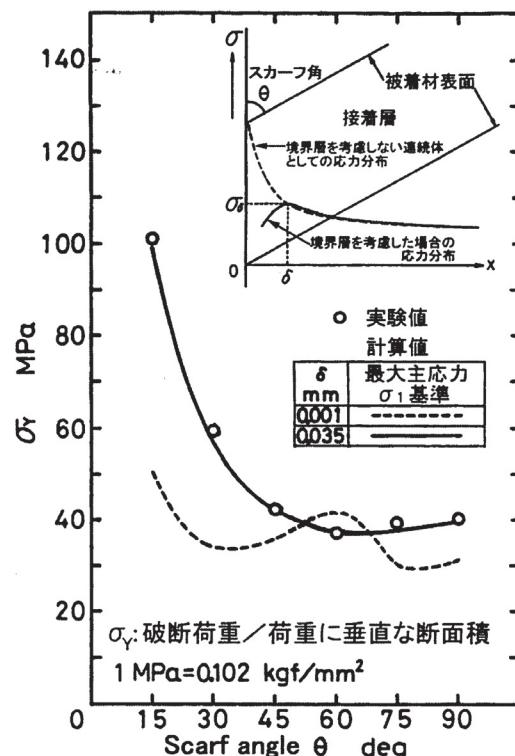


(b) 被着材表面に微細な凹凸を多数作り、実質接着面積を増加させた場合

第9図 被着材表面への微細凹凸形成による接着強度向上の効果

もせん断荷重が加わった場合も、基本的に接着界面において破壊が生じることになる。

そこで、さらに接着強度を増加させるためには、第9図(b)のように微細な凹凸を形成して表面積を増加させる必要がある。表面をこの図のように多数のV字形溝に近似すると（実際には円錐形または円柱形に近い）、第10図のようなスカーフ継手が多数存在することになる<sup>(21)</sup>。この図に示すように、ぜい性接着剤を用いたスカーフ継手においてさえも微小部分の応力集中は強度に影響を与える、スカーフ角θが小さくなるほど、すなわち接着面積が大きくなるほど接着強度が増加するという結果が得られており<sup>(21)</sup>、これは一般的な接着継手における微細凹凸の場合も同様と考えられる。



第10図 ぜい性接着剤によるスカーフ継手の接着強度実験値と計算値との比較<sup>(21)</sup>

単純化すれば、第9図(b)の微細なV字形斜面の接着部が支える引張またはせん断荷重の方が、幅2tの接着剤の引張またはせん断荷重破断荷重より大きければ、接着剤自身の破断、すなわち凝集破壊が生じることになる。

第4表 接着接合の長所と短所<sup>22</sup>

長 所	短 所
(1)応力が均一に分布する。 (2)接着剤の変形を防ぎ、構造を強化する。 (3)疲労強さを増大する。 (4)異種材料の接合が可能。 (5)接合に高温を必要としない。 (6)振動を防止する。 (7)重量を軽くする。 (8)表面を平滑にして、美観を与える。 (9)気密、水密ができる。 (10)熱、電気を絶縁する。	(1)硬化に時間がかかる。 (2)熱硬化性接着剤を使用する時は、特別な加圧装置や加熱装置が必要である。 (3)二成分形接着剤を使用する時は、使用前に樹脂成分と硬化剤の正確な計量と混合が必要である。 (4)可燃性、刺激性、毒性のものが多い。 (5)表面処理を必要とし、特殊な場合は化成処理が必要である。 (6)耐熱性に限界がある。 (7)はく離方向の力に弱い。 (8)接合部の解体が困難である。 (9)硬化収縮による内部ひずみがある。 (10)接着強さにバラツキがある。 (11)接着剤の選定がむずかしい。 (12)接着の耐久性が不明である。 (13)接着の良否の判定がむずかしい。

### 3. 各種接着接合部の応力分布、機械的特性、および破壊条件

#### 3-1 接着接合の長所と短所

第4表に接着接合の長所および短所をまとめ示す<sup>22</sup>。接着接合の短所をよく理解し、接着強度を高めるように配慮するとともに、長所が十分発揮されるような条件で使用することが望ましい。

#### 3-2 各種接着継手形式

第11図は従来からある各種接着継手形式である<sup>23~25</sup>。これらのいくつかについて、以下に、

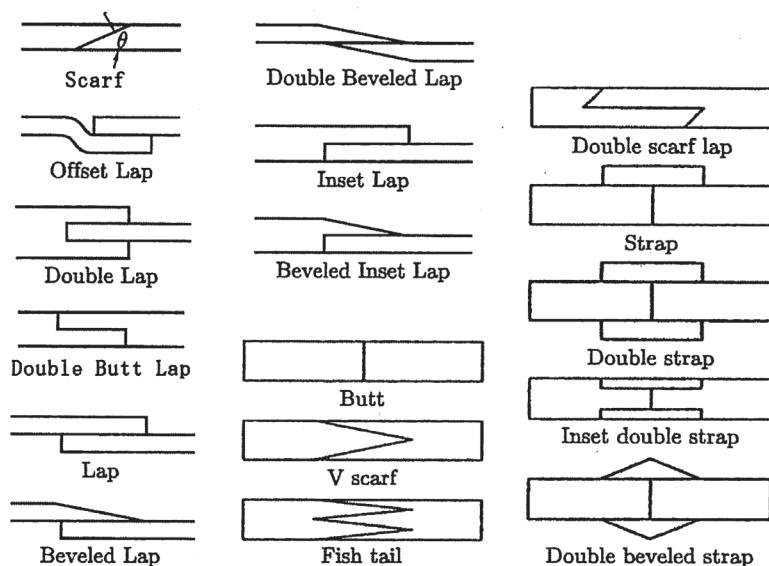
解説する。

##### (1) 突合せ (Butt) 継手

単純な継手であるが、接着面積を大きく取りにくく、延性接着剤を用いた場合でも、塑性拘束によりせい性破壊するという欠点を有しているため<sup>26</sup>、単独では避けるべき継手形状である。

##### (2) スカーフ (Scarf) 継手

接着層において、端部近傍を除き、ほとんど一定の応力分布を示し<sup>21</sup>、スカーフ角θを小さくすれば接合材の強度がほとんど被接合材母材の強度に等しくなるという長所があるが、被着

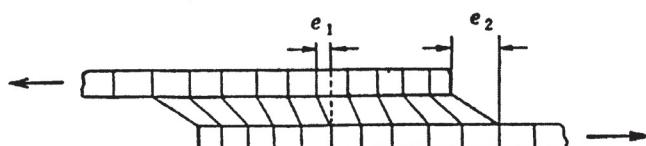
第11図 各種接着継手形式<sup>23~25</sup>

材の加工に工数を要する。木材、合板、および航空機において用いられる。

スカーフ継手の接着層内は組み合わせ応力状態で、スカーフ角 $\theta$ を変えることでせん断応力と垂直応力の比率を任意に変えることができる。弾塑性接着剤を用いた継手において、およそ $\theta < 60^\circ$ においてはvon Misesの条件により降伏（せん断破壊）が生じるが、 $\theta \geq 60^\circ$ においては塑性拘束によりせい性破壊が生じる<sup>26)</sup>。

### (3) 重ね合せ (Lap) 継手

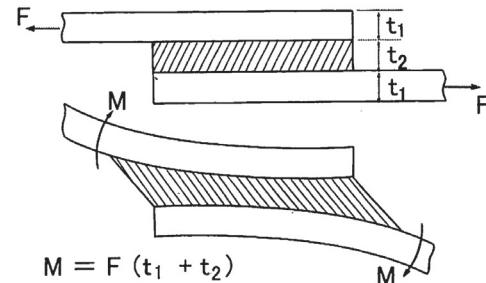
重ね合せ継手は実用性が最も高く、基本的な接着接合法であるが、接着面端部には第12図のような被着材の偏差的伸び<sup>27)</sup>に起因する大きな応力集中が発生することが特徴であり、古くから種々の応力解析が行われてきた。



第12図 被着材の接着面端部に生じる偏差的伸び<sup>27)</sup>

単純重ね合せ継手に引張り荷重がかかる場合、第13図のように接着部には偏心荷重による曲げモーメントが生じ、その結果接着部端には面に垂直方向のはく離応力が発生し<sup>28)</sup>、強度低下の原因となる。

接着端部における応力集中を減少させるためには被着材端部にテープを付けた第11図のBeveled Lap、Double Beveled Lap、およびBeveled Inset Lapの各継手が用いられる。



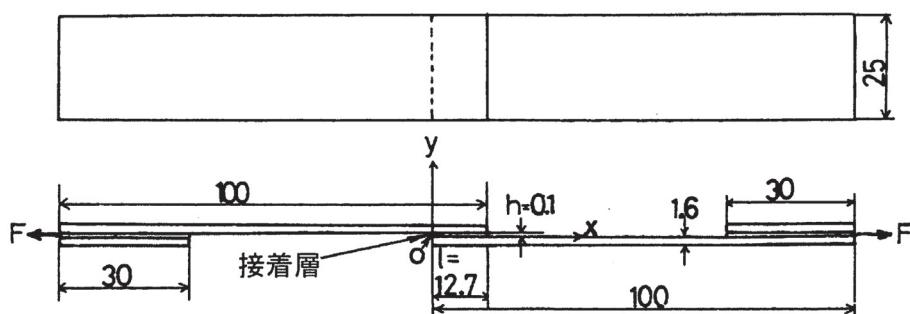
第13図 偏心荷重の曲げモーメントによるはく離応力発生の模式図<sup>28)</sup>

第14図の2液性エポキシ系接着剤によるA5052P-1.6mm厚の単純重ね合せ継手<sup>29)</sup>の弾塑性FEM解析結果を第15図<sup>29)</sup>に示す。

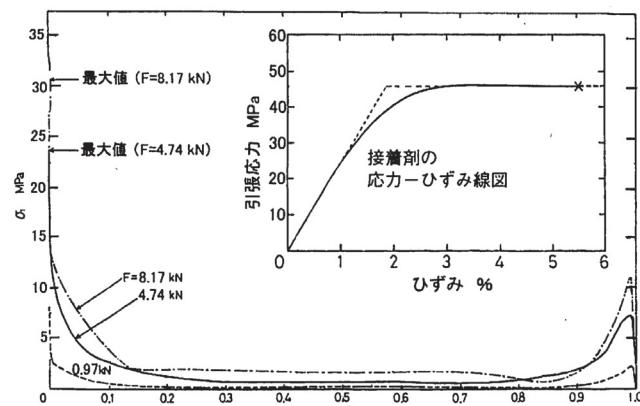
第15図において、引張荷重 $F = 0.97\text{kN}$ がこの継手の弾性限界で、それ以上の荷重の増加により、最大せん断応力 $\tau_{\max}$ およびvon Misesの相当応力 $\sigma_{eq}$ は塑性域が次第に増加し、 $F = 8.17\text{kN}$ においてほぼ全面降伏状態となる。しかし、最大主応力 $\sigma_1$ は、荷重の増加とともに増加している。

一方、実際の継手の引張試験結果においては、 $F = 7.16\text{kN}$ と前記の接着層が全面降伏する時の荷重に対し88%の荷重で破壊している<sup>29)</sup>。これは、接着層の破壊が $\tau_{\max}$ および $\sigma_{eq}$ などのせん断応力によるのではなく、第13図の曲げモーメントに起因して発生する最大主応力 $\sigma_1$ によりはく離破壊が生じたことを意味している。しかし、 $\sigma_1$ は接着端で応力特異性を示すため、この応力値を用いて破壊荷重を予測することができない。

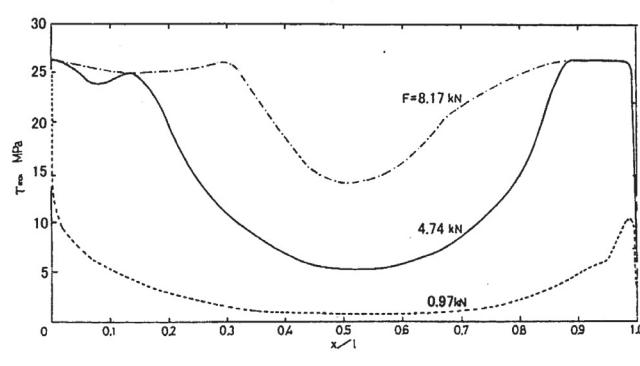
第16図のA6061-T6-7mm厚をフィルム形エ



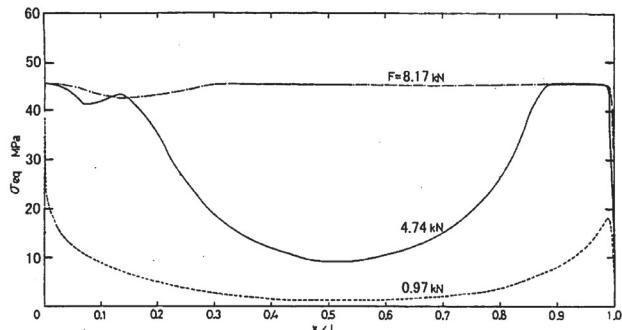
第14図 AIの重ね合せ接着継手試験片寸法<sup>29)</sup>



(a) 最大主応力分布図



(b) 最大せん断応力分布図



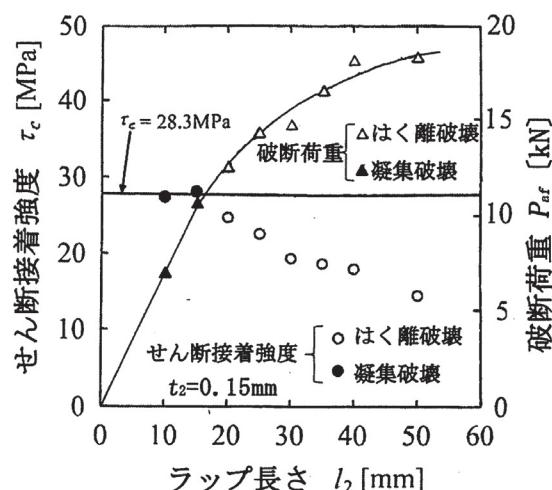
(c) von Misesの相当応力分布図

第15図 Alの重ね合せ接着継手の接着層境界における応力分布図<sup>30</sup>

ポキシ系接着剤で接着した単純重ね合せ継手のせん断接着強度および破断荷重を第17図に示す。

す<sup>(30~32)</sup>。

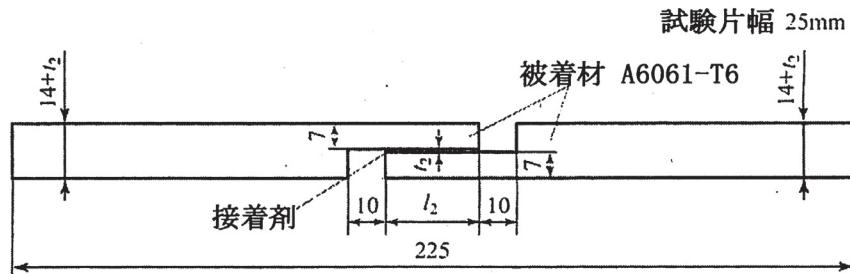
第17図において、破断荷重 $P_{af}$ はラップ長さ $l_2 \leq 14\text{mm}$ では $l_2$ に比例して増加する(von Misesの相当応力 $\sigma_{eq} = \text{一定}$ の条件で降伏するため、せん断応力 $\tau_c = \text{一定}$ )が、 $l_2 > 14\text{mm}$ では $l_2$ に比例せず、増加が鈍る。これは、 $l_2$ の増加により破壊に至るまでの荷重 $F$ が増加し、第13図の曲げモーメント $M$ が大となりはく離破壊が生じるためである。

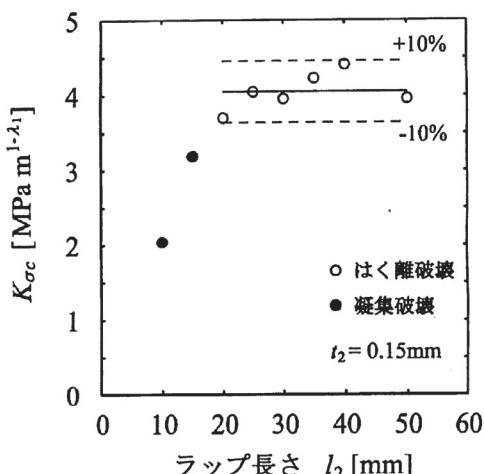
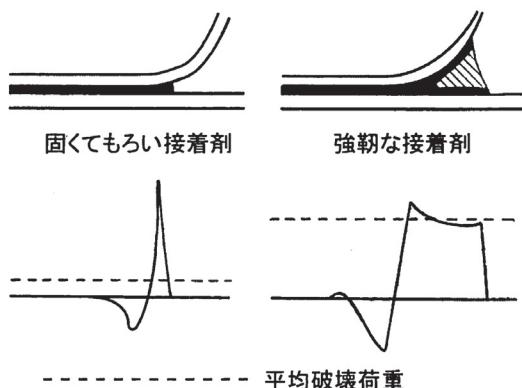
第17図 Alの単純重ね合せ継手のせん断接着強度および破断荷重実験値<sup>(30~32)</sup>

第18図は、第16図の継手の接着層端部における特異応力場の強さ $K_{oc}$ とラップ長さ $l_2$ との関係であり、 $l_2 \leq 20\text{mm}$ では、接着層端部における特異応力場の強さ $K_{oc} = \text{一定}$ の条件ではなく離破壊が生じていることが野田らの解析により示された<sup>(30,32)</sup>。

### 3-3 はく離応力の分布

第19図は、固くてもろい接着剤と強靭な接着剤による接着部にはく離荷重が加わった場合

第16図 A6061-T6の単純重ね合せ継手の形状および寸法<sup>(30~32)</sup>

第18図 破断時の  $K_{\sigma c}$  とラップ長さ  $l_2$  との関係<sup>30,32</sup>第19図 固くてもろい接着剤と強靭な接着剤のはく離応力分布<sup>33</sup>

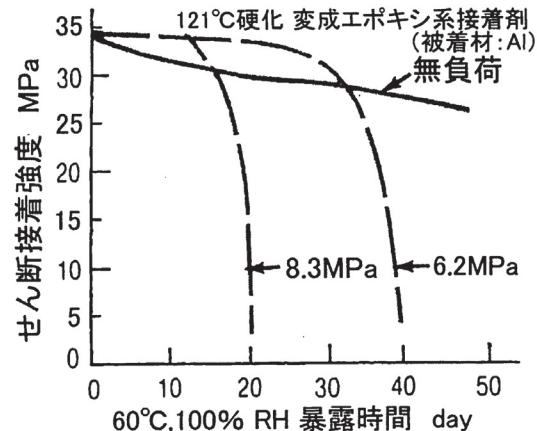
の応力分布であり<sup>33</sup>、強靭な接着剤を用いた場合の方が大きなはく離強度を示す。

はく離荷重を負担する接着部の面積（図の左右方向の長さ）は通常数mm以下とわずかであり、小さな荷重ではく離破壊が生じるため、接着接合部にはできるだけ接着面に垂直方向のはく離荷重をかけないような構造に設計をするべきである。

#### 4. 接着接合部の耐久性について

##### 4-1 加速による耐久性寿命予測法

接着接合部の劣化は、主として3種類のストレス、すなわち①温度、②湿度、および③機械的応力の負荷により加速される。第20図はボーイング社による航空機用Al板接着接合部の高温高湿条件下のせん断接着強度保持率と暴露時間との関係<sup>34</sup>で、接合部の初期接着強度が

第20図 高温高湿条件下の重ね合せ継手の残存せん断接着強度に対する負荷応力の影響<sup>34</sup>

34MPaである継手は、無負荷応力状態では接着強度の減少がわずかであるが、負荷応力が6.2MPa(初期接着強度の18%)および8.3MPa(初期接着強度の24%)の場合は急速に接着強度が低下しており、高温高湿条件下では、負荷応力の寿命に与える影響が大きいことが分かる。

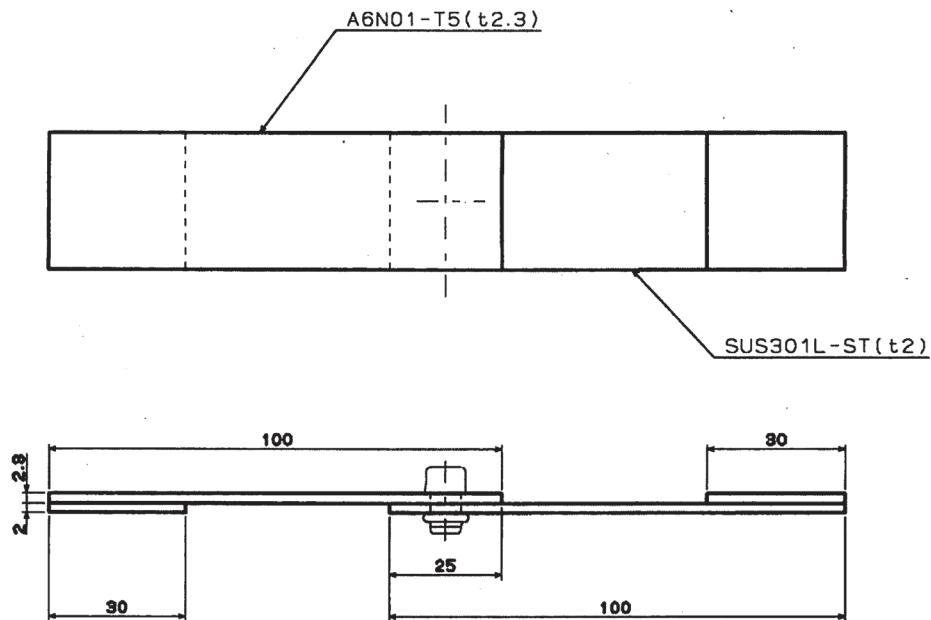
継手の寿命  $L$  (h) は次のアイリングの式により予測することができる<sup>35</sup>。指數関数  $\exp$  の項はアレニウス式である。

$$L = d_1 S^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) = d_2 S_h^{-h} S_m^{-m} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \cdots (7)$$

ここで、 $d_1 \sim d_2$ ：比例定数、 $E_a$ ：活性化エネルギー、 $R$ ：気体定数 (8.3145J/mol/K)、 $T$ ：絶対温度 (K)、 $S_h$  および  $S_m$ ：湿度 (絶対または相対) および機械的応力、 $h$  および  $m$ ：湿度および機械的応力に関する指数である。

式(7)の両辺の対数を取れば、 $\ln L$  と  $\ln S_h$ 、 $\ln S_m$  および  $1/T$  とが直線関係となるため、2点以上の使用条件より高い湿度  $S_h$ 、大きな応力  $S_m$ 、および高い温度  $T$ において加速寿命試験を行い（他の条件は一定とする）、外挿により、実使用条件における寿命が予測できる<sup>36</sup>。

また、各直線の勾配から指數  $h$ 、 $m$ 、および活性化エネルギー  $E_a$  の値が得られる。さらにそれらの実験値を式(7)に代入することにより比例定数  $d_2$  の値が複数個得られるので、その平均値を取って寿命予測式(7)が確定される。



第21図 リベットボンディング試験片の形状および寸法<sup>35)</sup>

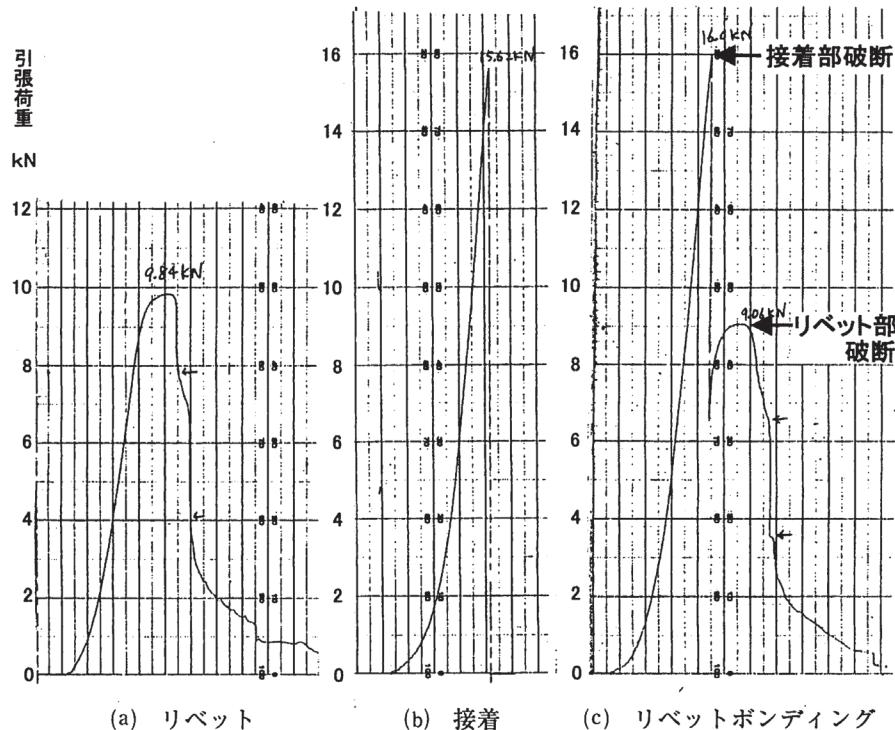
#### 4-2 リベット併用による補強方法

前節で述べたように、接着部に応力がかかる場合に劣化速度が増加するのを防止する対策として、第21図のようにブラインドリベットを併用する方法がある<sup>35)</sup>。

第22図(c)はリベットボンディング試験片の荷重-伸び線図<sup>35)</sup>で、接着部が破断した後リベ

ット部が破断しているが、弾性係数がより小さい接着剤を用いることにより、リベット部の負担荷重を増加させることができある。

リベットボンディング継手は、リベット継手および接着継手より疲労強度が向上するという利点も有り<sup>35)</sup>、これはスポット溶接と接着併用の場合も同様である<sup>35)</sup>。



第22図 静的引張り荷重-伸び線図（リベット、接着、およびリベットボンディング）<sup>35)</sup>

## 5. おわりに：建築設備関連における接着接合技術の今後の展望

建築設備関連においては、従来から合板、集成材、建物の床、壁、天井、新旧コンクリートの打ち継ぎ、アンカーボルトの固着、ひび割れ注入補修などへ接着剤が広く用いられている。

また、鋼板接着補強工法においてはエポキシ樹脂系接着剤が、炭素繊維シート、アラミド繊維シートなどの連続繊維シートによる補強工法においてはエポキシ樹脂系およびアクリル樹脂系接着剤が用いられている<sup>36)</sup>。

さらに、エポキシ系接着剤による既存のはりまたは柱と鉄骨枠の鉄骨プレース接着工法、変成シリコーンエポキシ樹脂系弾性接着剤によるタイル張り工法<sup>36)</sup>など、接着剤の高性能化に伴って接着剤の応用分野が今後ますます拡大していくものと考えられる。

### <参考文献>

- (1) 鈴木靖昭：日本接着学会誌, 54, 169-186 (2018)
- (2) 鈴木靖昭：樹脂－金属・セラミックス・ガラス・ゴム異種材料接着／接合技術（落合杏月編），サイエンス&テクノロジー，pp.1-19, pp.77-118 (2017)
- (3) 畑 敏雄・斎藤隆則・接着ハンドブック 第3版, 日本接着学会編, 日刊工業新聞社, pp.5-16 (1996)
- (4) K.W.Allen, Analytical Proceedings, 29(9), pp.389-391 (1992)
- (5) 井本立也：工業材料, 31-2, 122 (1983)
- (6) R.J.Schliekelmann・林 肇監訳：接着金属構造, 日刊工業新聞社, p.8 (1977)
- (7) S.S.Voyutskii, Autohesion and Adhesion of High Polymers, Interscience Publ. (1963)
- (8) 三刀基郷：接着ハンドブック第4版, 日本接着学会編, 日刊工業新聞社, p.13 (2007)
- (9) W.A.Zisman, Contact Angle, Wettability and Adhesion (Advances in Chemistry Series, No.43), Am. Chem. Soc., pp.1-51 (1964)
- (10) A. J. Kinloch, L. S. Welch, H. E. Bishop, J. Adhesion, 16, 165 (1984)
- (11) 竹本喜一・三刀基郷：接着の化学, 講談社, p.69 (2010)
- (12) 横堀武夫, 材料強度学 第2版, pp.5-13 (1986), 岩波書店
- (13) 横堀武夫：材料強度学, p.1 (1966), 技報堂
- (14) 井本 稔・黄 慶雲：接着とはどういうことか, 岩波新書, 岩波書店, pp.33-54 (1980)
- (15) J.H.Hildebrand, R.L.Scott, The Solubility of Nonelectrolytes 3rd ed., Reinhold, New York (1958)
- (16) 中尾一宗：接着ハンドブック, 日本接着学会編, 日刊工業新聞社, p.157 (1980)
- (17) Y. Iyengar, D. E. Erickson, J. Appl. Polym. Sci., 11, 2311 (1967)
- (18) 小川俊夫：高分子材料化学, 共立出版, pp.49-78 (2009)
- (19) 伊保内賢：接着ハンドブック 第3版, 日本接着学会編, p.835 (1996), 日刊工業新聞社
- (20) 中尾一宗：高分子, 19, 472-484 (1970)
- (21) 鈴木靖昭：日本機械学会論文集, 50, No.451, A編, 526-533 (1984)
- (22) 若林一民：新版接着技術総覧, 西口公之編, 産業技術サービスセンター (1994), pp.541-560
- (23) 福村勉郎”接着 理論と応用, 高分子学会編, 丸善, (1959), p.408
- (24) 金丸 競：接着と接着剤, 大日本図書 (1973), p.69
- (25) 中島常雄：工業材料, 21, 102 (1973)
- (26) 鈴木靖昭：日本機械学会論文集, 51-463, A編, 926-934 (1985)
- (27) 小畠陽之助：接着－理論と応用－, 高分子学会編, 丸善, (1959), p.257
- (28) 前川善一郎：複合材料ハンドブック, 日本複合材料学会編, 日刊工業新聞社 (1989), p.201
- (29) 鈴木靖昭：日本機械学会 (No.900-86) 材料力学講演論文集, 395-397 (1990)
- (30) 宮崎達二郎・野田尚昭・内木場卓巳・李 戎・佐野義一：自動車技術会論文集, 45, 895-901 (2014)
- (31) J.-H. Park, J.-H. Choi, and J.-H. Kweon, Composite Structures, 92, 2226-2235 (2010)
- (32) 野田尚昭・堀田源治・佐野義一・高瀬 康：異種接合材の材料力学と応力集中, コロナ社 (2017)
- (33) 柳原榮一：接着のトラブル対策, pp.181-182 (2006), 日刊工業新聞社
- (34) Marceau, J.A., Moji Y. and McMillan, J.C., Adhesive Age, october, 28-34 (1976)
- (35) 鈴木靖昭：長期信頼性・高耐久性を得るための接着／接合における試験評価技術と寿命予測, サイエンス&テクノロジー (2013), pp.133-164
- (36) 楢本真也：日本接着学会編, 接着ハンドブック 第4版, pp.1051-1065 (2007)

### 【筆者紹介】

#### 鈴木靖昭

鈴木接着技術研究所 所長

〈主なる業務歴及び資格〉

1965年名古屋工業大学 工業化学科卒業。同年日本車輌製造株入社。技術研究所～開発本部に所属。高圧発電機絶縁用エポキシ樹脂の開発、FRP・CFRPの応用研究、有機材料の故障解析、鉄道車両用接着継手の強度・破壊条件・耐久性に関する研究等に従事。名城大学および中部大学非常勤講師を経て、2014年鈴木接着技術研究所を設立、接着技術コンサルタント。

工学博士（名古屋大学）、技術士（機械部門：構造接着）

