

最近の接着技術の進歩

解説

池上 皓三*

Recent Advance in Adhesive Technologies

Kozo IKEGAMI

1. ま え が き

「接着」という言葉から、澱粉でつくった糊による接着を、思い浮かべる人が多いのではなからうか。さらには、はがれやすい、汚れやすい、というイメージを連想する人も多いはずである。従来の接着は、ラベルや障子紙を貼るような付着技術の性格が強く、荷重伝達などの機能に接着接合を用いることはほとんどなかった。しかし、最近の接着技術の性格は、大きく変わりつつある。その背景として、高い接着力を有する高分子材料の接着剤の開発と実用化、さらに複合材料などのいわゆる新素材の接合の必要性から、接着技術は急速に発展しつつある。本解説では、最近の接着の利用方法をいくつか紹介するとともに、接着接合の強度評価の問題についても述べる。

2. 接着接合法の特徴

ボルトナットやリベットなどによる機械的接合法と比較して、接着接合法の特徴を列記するとつぎのようになる。長所としては、

(1) 平滑な構造が作れる。

ボルトナットやネジによる接合にくらべて、被着体の接合による形状変化が少なく、応力集中の程度を低くすることができる。

(2) 軽量構造ができる。

接着接合した場合の接着剤層の厚さは、数十 μm 程度であり、接着に必要とする接着剤の付加重量は、きわめて小さい。

(3) 振動吸収機能をもつ。

高分子材料の接着剤によつて接合した場合、接着剤層が振動を吸収し、振動の減衰機能を発揮する。

(4) 複雑な形状部品、薄い膜状物体の接合ができる。

接着剤の流動性を利用して、複雑な形状の接合面をもつ部品、さらに、微少部品や薄膜の接合ができる。

(5) 気密機能をもつ。

固体の接合面の不均一形状を接着剤によつて補正し、接合面の気密性を高めることができる。

(6) 異種材料の接合に適する。

異種金属の被着体を接触させて接合すると、被着体に電食が生ずる。接着接合の場合には、接着剤層が絶縁帯となつて電食を防ぐ。

短所としては、

(1) 耐熱性が低い。

高分子材料の耐熱性は、金属材料に比べて低いため、金属材料を接着接合した場合には、その耐熱性は高分子材料の低い耐熱性によつて決まる。

(2) 被着体の前処理が必要である。

この処理のため作業に時間がかかる場合もあり、また、処理後の接合面が、接着に適しているかどうか、簡単に検査できない。

(3) 硬化に時間がかかる。

接着剤が液体から固体に変化するのに、ある程度の長さの時間が必要で、接合後ただちに使用可能とはならない。

(4) 非破壊検査が困難である。

接着された状態で、十分な接着強度が得られているかどうか、検査する方法はほとんどない。

(5) 解体がむづかしい。

ネジ接合のように、簡単に接合部材の取りはずしができない。

3. 接着技術の応用例

接着は日用品から宇宙機器にいたるまで、きわめて広範囲に用いられている。ここでは、接着技術の利用方法を、いくつか紹介する。

3.1 航空宇宙機器

軽量構造の要求が最も厳しい分野であり、比較的早くから、航空機構造に接着技術が用いられている。オランダの Fokker 社は、第2次世界大戦後から、接着剤の航

昭和 62 年 7 月 9 日受付 (Received July 9, 1987) (依頼解説)

* 東京工業大学精密工学研究所 教授 工博 (Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuda-cho Midori-ku Yokohama 227)

Key words : adhesion ; adhesive ; adhesive strength ; weight reduction ; joint ; composite material ; metallic material ; plastics ; ceramics ; fracture strength.

空機構造への応用研究を行ってきた。同社は航空機構造に接着技術を利用したときの利点を、つぎのように考えている¹⁾。

- (1) 接着接合による荷重伝達の安定性、耐損傷性の向上、機体構造の重量軽減
- (2) 接合部のギャップやリベット孔の除去による耐久性、耐食性の向上

- (3) 打鋸作業の不要による組立作業の生産性向上
- (4) 接合部の空気、燃料、雨水に対するシール性の向上

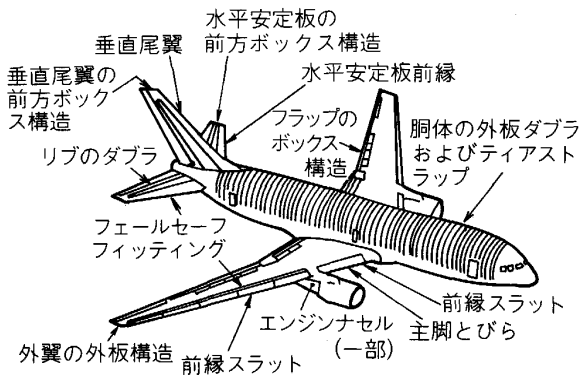


図 1 Boeing 757 と 767 の接着適用箇所

図 1 は Boeing 757 および 767 に、接着構造が適用されている箇所を示す¹⁾²⁾。航空機にはハニカムサンドイッチパネルが多量に使用されるが、これは典型的な接着構造である。また、胴体構造の補強板の接合にも接着剤が使用されている。さらに、最近では複合材料の利用が進み、複合材料による部品は、ほとんど接着接合されている。

図 2 はスペースシャトルのオービタの熱防護システムに用いられている材料の構成を示したものである³⁾。オービタの機体表面の約 70% の面積は、いわゆるタイルと呼ばれる断熱材によって接着されているが、このほかにも、図 2 に示すような種々の断熱材が用いられており、いずれも接着接合されている。図 3 はオービタの断熱タイルの接着構造の一例である³⁾。オービタ外板のアルミ板に、ひずみ絶縁板とタイル間からの熱流入を防ぐファイラバーが接着され、そのうえに耐熱タイルが接着さ

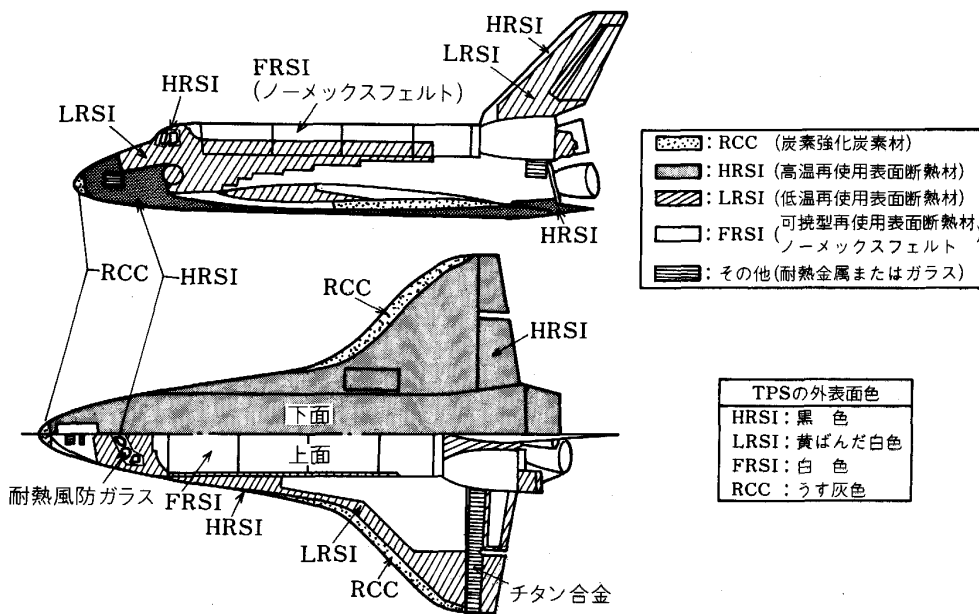


図 2 コロンビア号の熱防護システム (TPS)

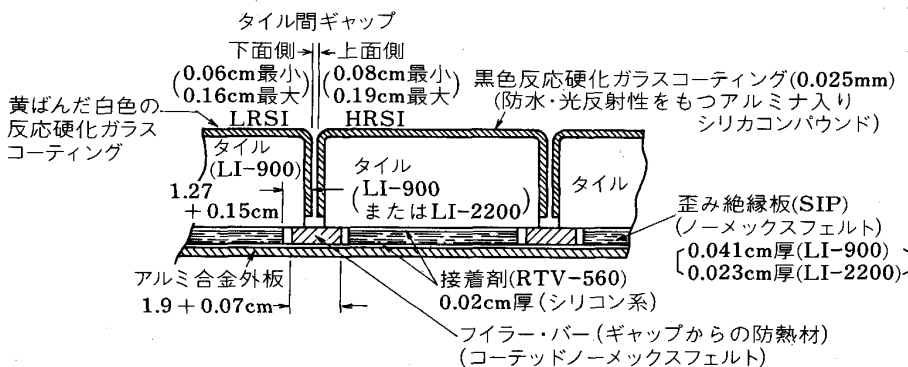


図 3 コロンビア号の外板と耐熱タイル接着構造

れている。

図4は固体ロケット H-I のロケットモーターの概要を示したものである。固体ロケットモーターの部材には、金属、ゴム、複合材料などが用いられており、異種材料の接合の必要性が高い。図4の例では、モーターケースとインシュレーション、インシュレーションと推進薬、ノズル構成部材の一部の接合に、接着剤が用いられている。

3.2 精密機械

工作機械のように、高い組立精度と加工性を要求される場合にも、接着技術が利用されている。接着の軽量性が利用目的の一つには違いないが、接着接合部の精度補正機能、あるいは振動減衰機能を利用することが多い。図5はフライス盤のコラム、ベットを、接着構造によって組み立てた方法を示したものである。フライス盤のオーバームも接着によって組み立てし、良好な振動減

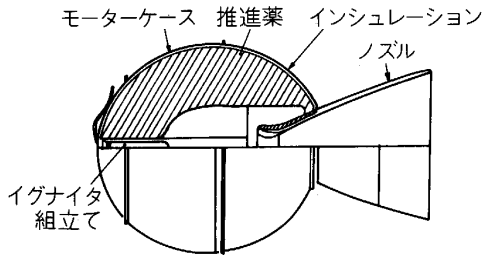


図4 H-I ロケット第3段固体ロケットモーターの概要

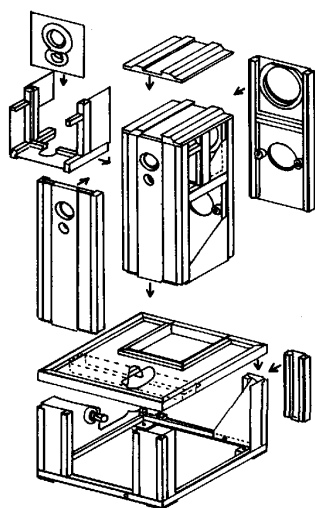


図5 フライス盤の接着組立法

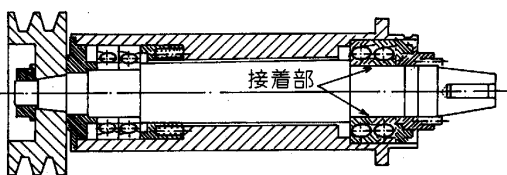


図6 接着構造のある研削砥石主軸

衰特性を得たので、さらに、本体も接着構造によつて組み立て、切削特性の向上を試みたものである⁵⁾。びびり振動の発生する切削幅を比較すると、接着構造の方が、溶接構造の場合より、大幅に向上している。

図6は研削砥石主軸に接着を用いた例である⁶⁾。これは接着剤層の厚さによつて、組立精度の調整を容易にし、ベアリング取付け部の焼入れや高い加工精度を不要にしている。通常の組立て構造と接着構造の場合を比較すると、静的剛性は接着構造の方が高かったが、動的剛性の方は、接着構造にしても、あまり向上しなかつた。接着構造を工作機械に応用し、その特性を詳細に研究した例がある⁷⁾。

図7は歯車を接着によつて組み立てた例である⁶⁾。歯車の種類はさまざま多く、その寸法は変化に富んでいる。歯車の歯形の部分(図7の(a))とハブの部分(図7の(b))を別々に製作し、それらを接着して歯車(図7の(c))を製作すれば、多種類の歯車の要求に対し、効率よく対応できる。さらに、歯の研削の容易さ、騒音レベルの低下効果、材料の節約などの利点を有している。

3.3 電気、電子機器

電気製品や電子部品には、金属、プラスチック、セラミックなど多くの種類の材料が使用されており、さらに形状が小さいものが多い。これら多種多様な材料でできた、複雑な形状の部品の接合には、接着は最も適した方法といえる。電気、電子機器に応用される接着には、絶

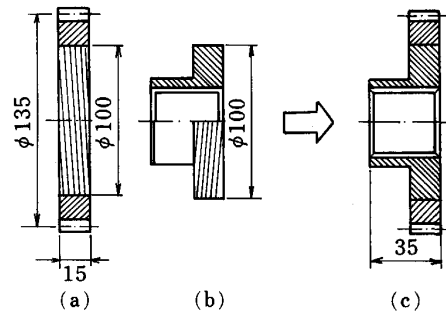


図7 接着による組立歯車

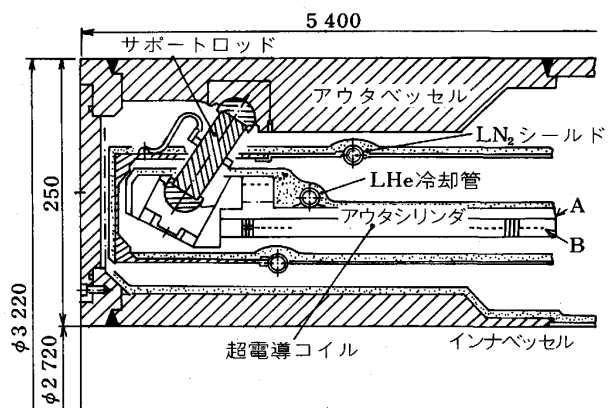


図8 超電導電磁石の主要断面

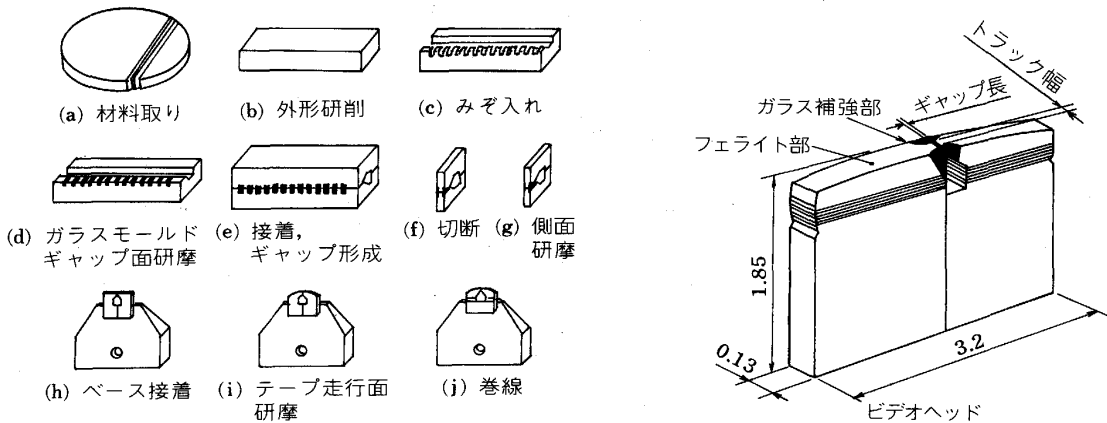


図10 ビデオヘッドの加工法

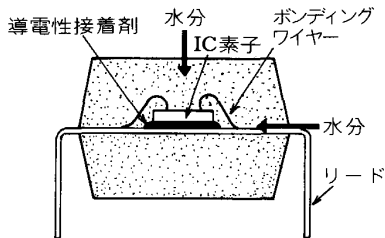


図9 ICの断面構造

縁、封止のような役割もあたえられている。図8は超電導磁石の主要部の断面を示したものである⁸⁾。この電磁石の製作に極低温用接着剤が用いられている。接着剤の用いられている箇所は、図8で、

- (1) アウタシリンダと対地絶縁材料間(図のAの部分)
- (2) 対地絶縁材料とコイルの間(図のBの部分)

である。このような箇所に用いられる接着剤は、絶縁性はもちろんのこと、熱伝導性、極低温での強度保持性、長時間の可使特性など、きわめて厳しい条件が要求される。

図9はICの断面構造を示したものである⁹⁾。素子は湿気、温度、汚染など、外部の環境条件から保護するため、樹脂封止されている。樹脂とワイヤーの間からの水分の流入を防ぐため、安定した高い接着性が要求される。さらに、樹脂からの湿気の影響を防ぐため、耐湿性の高いことも必要である。また、樹脂の硬化収縮によつて、大きな内部応力が生じると、素子とワイヤーに影響をあたえるので、硬化時の低収縮性が要求される。

図10はビデオヘッドとその加工工程を示したものである¹⁰⁾。ヘッドのギャップの形成、ベースへの接合の際に必要な高い寸法精度は、接着によつて実現されている。ヘッド面の機械加工の必要性から、接着剤の耐油性、耐火性も要求され、さらに、ヘッドギャップの寸法維持から、接着後の形状変化のないことも要求される。

4. 接着接合部の強度評価¹¹⁾

4.1 強度評価上の問題点

接着によつて機械要素を接合したとき、まず問題となるのは接合部の強度をどのようにして評価するのかということである。通常、機械要素の強度評価をするとき、ある大きさの外力状態での応力分布を解析し、その応力分布と機械要素を構成する材料の強度とを比較する。この比較から機械要素に加えることのできる外力値を決め、その値を機械要素の強度とすることが多い。接着接合部の強度評価を行うために、その部分の応力解析を行い、被着体、接着剤層の強度とその応力分布を比較し、被着体と接着剤層に破損の生じる外力値をそれぞれ決める。それらの値のうち、小さい方の外力値を接着接合部の強度とした場合を考える。このようにして得られた値は、実際の接着接合部の強度より、大きくなることが多い。これは接着接合部の破損が、被着体、接着剤層のほかに、接着界面でも生じるからである。被着体、接着剤層の強度を評価するとき、被着体、接着剤それぞれ単独の材料の強度を用いればよい。このとき、被着体、接着剤層の内部では、組合せ応力状態になつているから、強度評価するとき用いるそれぞれの材料の強度は、組合せ応力状態で決めた材料の強度則を用いる必要がある。たとえば、金属材料に対しては、Misesの条件、あるいは、Trescaの条件などがある。接着界面の強度評価をするとき、どのような強度則を用いればよいのか、ほとんど議論されていない。この点が接着接合部の強度評価上の最も困難な問題である。接着接合部の応力解析の研究結果は、きわめて多く発表されているのに、その結果を接着接合部の強度評価に十分生かされない理由はここにある。

4.2 接着強度則

接着界面強度は被着体の表面状態、被着体と接着剤との物理化学的性質など、きわめて多くの因子が関連している。これら多くの関連因子と接着界面強度との関係を

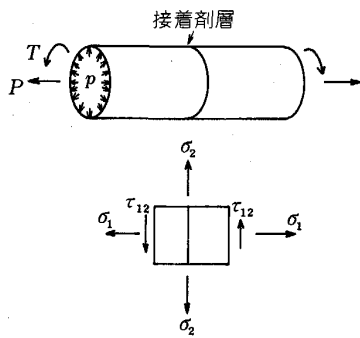


図 11 薄肉円筒突合せ継手の組合せ荷重実験

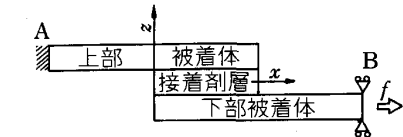
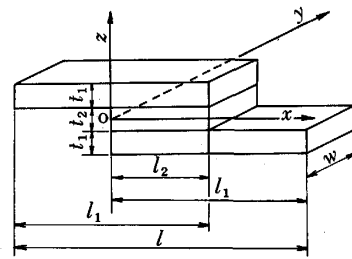


図 13 単純重ね合せ継手のモデル

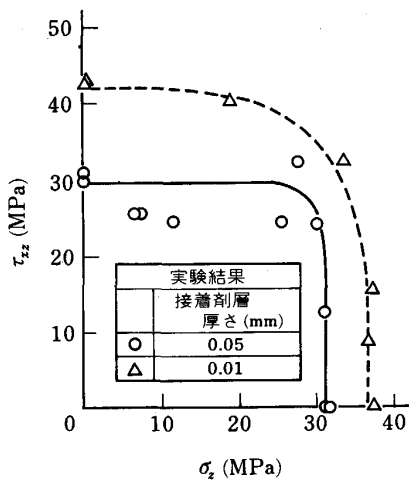


図 12 接着強度則の実験結果

明らかにすることは、きわめて困難である。そこで何らかの実験的な方法で、接着界面強度を測定し、その結果を接着接合部の強度評価に使用せざるをえない。

単一材料の強度則を測定するときには、その材料に一樣な応力成分の組合せを負荷して強度実験を行う。したがって、接着要素の接着剤層で被着体の界面に、一樣な応力分布の組合せを負荷して強度実験を行い、種々の組合せ応力状態でのその接着要素の強度を、接着界面での強度則に対応させる。このようにして定めた強度則を、以後、接着強度則と呼ぶことにする。

接着強度則を実験的に定めるには、接着剤層に一樣な応力の組合せを負荷する必要がある。この方法の一つとして、図 11 に示すように、薄肉円筒の突合せ継手に軸荷重 P 、ねじり T および内圧 p の組合せを負荷すると、接着剤と被着体の界面にはほぼ一樣な応力の組合せを負荷できる¹²⁾。図 12 はこの方法によつて測定した接着強度則の一例である。軟鋼製の薄肉円筒を、エポキシ樹脂で突合せ接着した試験片に、引張荷重とねじり荷重を加えて測定された。図の σ_z 、 τ_{zz} は、それぞれ試験片が破損したときの引張応力とせん断応力で、2種類の接着剤層の厚さに対して、実験が行われた。

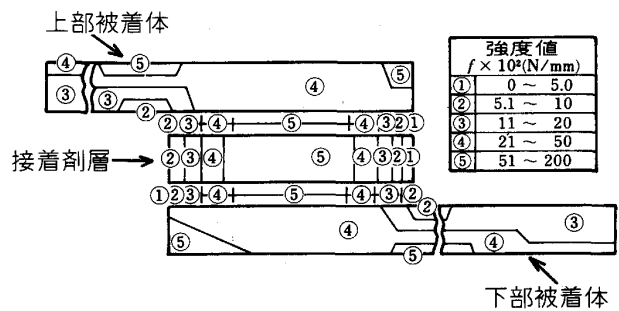


図 14 単純重ね合せ継手の強度分布

4.3 接着強度則を用いた強度評価

接着接合部の強度評価には、被着体、接着剤の強度則のほか、接着界面での接着強度則をも用いる。まず、接着接合部の応力解析を行い、被着体、接着剤層、接着界面の応力分布に、それぞれの強度則を適用する。これによつて、それぞれの部分の破損荷重を決定する。このようにして得られた三つの破損荷重のうち、最小の値の荷重を、接着接合部の強度とする。

この方法を単純重ね合せ継手に適用した例を示す¹³⁾。図 13 は単純重ね合せ継手のモデルと、その境界条件である。継手の一端を固定、もう一端に引張荷重 f (単位幅あたり) を加えている。被着体は軟鋼、接着剤はエポキシ樹脂である。このときの継手内の応力分布を有限要素法によつて解析している。被着体、接着剤層、接着界面に、それぞれの強度則を適用し、同じ程度の大きさの強度をもつ領域を、区分別けしたのが図 14 である。図の数字の領域の番号は、図中の表に示された荷重値に対応し、この荷重を継手に加えると、その領域で破損が生ずることを示している。図 14 から、この継手で最初に破損するところは、領域 1 の部分で、上部被着体と接着界面の右端、接着剤層の右端、下部被着体と接着界面の左端である。なお、図 14 の強度分布図を描くときに用いた強度則は、被着体、接着剤層に対しては、

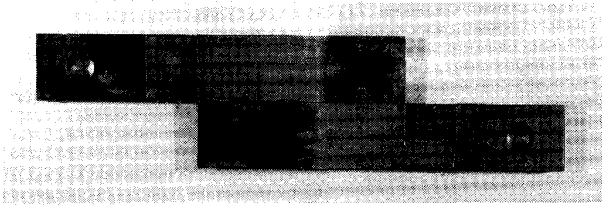


写真 1 破損した単純重ね合せ継手の接着面

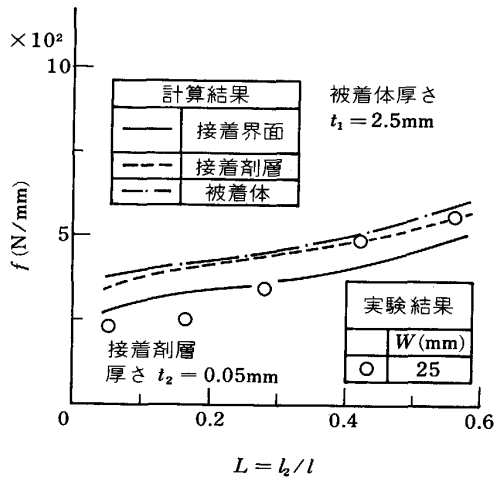


図 15 単純重ね合せ継手のせん断引張強度

Mises の条件, 接着界面に対しては図 12 の接着強度則を定式化した条件である. 写真 1 は引張せん断荷重を加えて, 破断した試験片の接着面を示したものである. 図の色の濃い部分が被着体表面, 色の淡い部分が接着剤層である. 接着剤層が上下被着体の表面に, ほぼ半分ずつ残っており, この試験片の破断が図 14 で示された最弱個所から進行したことを示している. 図 15 は接着長さを変化させたときの継手強度を, 上述の方法で計算した値と実験によって測定した値の比較を示したものであ

る. 図中の一点鎖線, 破線, 実線は, それぞれ被着体, 接着剤層, 接着界面の強度則から計算した継手強度である. 接着界面から計算した継手強度が最も小さく, この値が継手強度に相当することを示している. 実験点もほぼ計算値と同様の傾向を示している. このように, 接着強度則による継手強度評価法は, 一つの有効な方法であるが, さらに, 継手の動的強度や疲労強度の予測法への拡張が期待される.

5. あとがき

最近の接着技術のいくつかと, 接着接合部の強度評価法を紹介した. 接着の歴史は長い, その信頼性は必ずしも高いとはいえない. 接着剤を製造する側と接着剤を使用する側の密接な協力によつて, 接着技術の信頼性が高まることを期待したい.

文 献

- 1) 伊藤好二: 日本接着協会誌, **21** (1985), p. 447
- 2) 熊野郁夫: 日本機械学会誌, **87** (1984), p. 266
- 3) 久保園晃: 日本接着協会誌, **17** (1981), p. 283
- 4) 江口昭裕, 間庭孝男: 日本接着協会誌, **22** (1986), p. 534
- 5) A. A. KHALIL and M. M. SADEK: Adhesion 8, ed. by K. W. ALLEN (1984), p. 55 [Elsevier Appl. Sci. Pub.]
- 6) 堤 正臣, 伊藤 諒: 日本接着協会誌, **21** (1985), p. 340
- 7) 坂田興亜, 碓井雄一: 機械技術研究所報告第 132 号 (1985)
- 8) F. TOKIMITSU, T. UMEGAKI and I. MOTOKI: Abstracts of Poster Papers, Int. Meeting, The Adhesion Society (1987), p. 49
- 9) 前田勝啓: 工業材料, **30** (1987), p. 35
- 10) 山内信也, 森田 稔: 日本機械学会誌, **84** (1981), p. 1131
- 11) 池上皓三: 日本機械学会論文集 A 編, **50** (1984), p. 1557
- 12) K. IREGAMI, M. KAJIYAMA, S. KAMIKO and E. SHIRATORI: J. Adhesion, **10** (1979), p. 25
- 13) 杉林俊雄, 池上皓三: 日本機械学会論文集 C 編, **50** (1984), p. 17