

接着接合固定端のローカルフレキシビリティ

市川大輔^{*1}・志田 茂^{*2}

Local Flexibility of Fixed Supports Bonded Adhesively

by

Daisuke ICHIKAWA and Shigeru SHIDA

(Received on Sept. 19, 1997)

Abstract

The fixed support is assumed to be rigid theoretically, but deforms slightly due to its local flexibility practically. In this paper, the local flexibility of fixed supports bonded adhesively is investigated experimentally and analytically.

As for the electronics parts which are represented by semiconductor devices and computer CPU modules, solder bonding and adhesion are usually used considering their electric characteristics and productivity. With the progress of large scale integration, the thermal stress in jointed parts tends to increase with an increase of the thermal density. Therefore, for the design of devices with high reliability, the structural design as well as electrical design becomes inevitable.

Especially, in the analysis of the thermal stress and thermal deformation of devices, the accuracy of their analysis is influenced by the estimation of local flexibility of fixed supports bonded adhesively. To make this point clear, cantilever tests are carried out by the adhesion model, the solid model, and the aluminum base adhesion model. As a result, it is shown that the degree of the deformation, i.e. local flexibility, at the fixed supports bonded adhesively is able to be quantitatively expressed in the relation between the dimensionless parameters ξ and ζ where ξ denotes the size of the bonded support and ζ the coefficient of the foundation which is the reciprocal of the local flexibility.

Keywords : *Adhesion model, Solid model, Cantilever, Fixed condition, Local flexibility*

1. 緒 言

ボルト締結, リベット結合, 溶接, 接着, はんだ接合など多くの接合法が, 接合技術の著しい進歩により広く利用されるようになっていく。その中でも, ボルト締結, リベット結合, 溶接などは構造部材として使用された実績も多く, 変形, 強度およびこれらの解析手法の研究が

系統的に行われてきた。

しかし, はんだ接合, 接着などの接合法については, 工業界で幅広く利用されているにもかかわらず, 構造部材としての使用実績は少なく, 変形, 強度, 応力ひずみ解析についての研究も構造設計上十分な知見が得られるほど多くはない。

半導体デバイスや計算機 CPU モジュールに代表され

* 1 工学研究科機械工学専攻博士課程前期

* 2 工学部生産機械工学科教授

るエレクトロニクス部品は、電気的特性や生産性の関係で、はんだ接合や接着が多用されている。これらは構造部材ではないが、高集積化に伴う発熱密度の増大により、接合部の熱応力は構造部材に生じる応力に匹敵する大きさになり、信頼性のあるデバイスのパッケージ設計には構造設計が不可避となっている¹⁾。

本研究は、構造全体の変形に影響を及ぼす、接着部の接合界面近傍の変形について検討することを目的としたものである。

特にエレクトロニクス部品の熱応力や熱変形を解析しようとする場合には、接合部固定条件を的確に把握するかどうかで、熱変形の解析精度は影響を受ける。この点を明らかにするために、片持ちはりを用いて、はりの接着固定端における変形の度合、すなわち接合界面近傍のローカルフレキシビリティ（局所的な可撓性）について検討した。

はりを接着によらず、基礎と一体化したソリッド材を用いても完全固定状態は得られず、1/2無限板におけるローカルフレキシビリティについてはO'Donnellによって報告されている²⁾。しかし、1/4無限板、さらには有限な接着長さのローカルフレキシビリティについて検討された例は見られない。また、実際面では発電機のエンドブラケットの変形解析に、そのボルト締結部のローカルフレキシビリティを考慮する必要があることが報告されている³⁾。

本報は接着接合形状がローカルフレキシビリティに及ぼす影響を、定量的に検討することを目的としたものである。

2. 記 号

- $P_{1,2}$: 荷重 [N]
- h : 板厚 [mm]
- b : 板幅 [mm]
- E : 縦弾性係数 [GPa]
- v : たわみ [mm]
- c : 接合部長さ [mm]
- L : 接合端から荷重点までの距離 [mm]
- a : 接合端からたわみ測定点までの距離 [mm]
- K : 基礎係数 [N/rad]
- M : 単位幅当たりの曲げモーメント [N]
- V : 単位幅当たりのせん断力 [N/mm]
- $\Delta\theta$: 傾き [rad]

3. 実験方法

供試材にはアクリル樹脂板（以下アクリルと称す）を

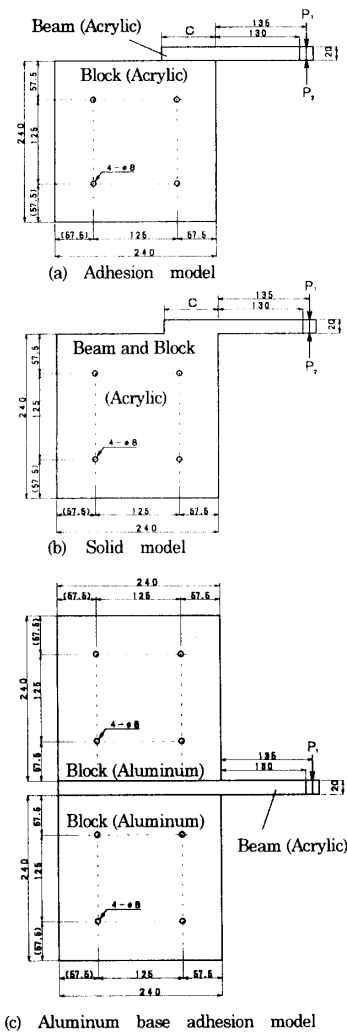


Fig. 3.1 Dimensions of specimens.

用い、接着モデルと一体モデルの試験片を作成した。試験片形状を Fig. 3.1 に示す。

Fig. 3.1 (a)は、アクリルのブロックとはりを接着剤によって c の長さで接合した接着モデルである。接合部の長さ c を変え、 P_1 及び P_2 方向より荷重を加えることにより、ローカルフレキシビリティに及ぼす接合部長さの影響を実験的に検討する。Fig. 3.1 (b)は、接合部に相当する部分を同体とした一体モデルである。接着モデルと同様に長さ c を変えて実験を行い、接着モデルとの比較を行う。Fig. 3.1 (c)は、はりにアクリルを、ブロックにはアルミニウム板（以下アルミと称す）を使用し両者を接着したアルミベース接着モデルである。

Fig. 3.1 (c)のような形の1/2無限板の一体モデルでもローカルフレキシビリティは存在し、完全固定にはならないことが知られている²⁾。そこで Fig. 3.1 (c)に示す試験片は、縦弾性係数がアクリルの約30倍であるアルミを

ブロックとし、アルミブロックの間にアクリルのはりをビルトインして接着したものである。完全固定に近い条件が得られるのではないかとこの考えにより用意したものである。

また、本研究における接着にはシアノアクリレート系接着剤を使用し、キュア条件は常温24時間放置とした。Fig. 3.1に示すブロックの部分をボルトによって(a), (b)は4箇所, (c)では8箇所を固定し、はりの先端部に荷重を加え、ブロックから130mmの位置のたわみをデジタル式変位計を用いて測定する。なお、荷重を加えてから2分後のたわみを測定値とした。試験片の寸法は次の通りである。

板 厚 : $h=20\text{mm}$

板 幅 : $b=15\text{mm}$

接着部長さ: 接着モデル

$c=15\sim 240\text{mm}$

: 一体モデル

$c=15\sim 240\text{mm}$

: アルミベース接着モデル

$c=240\text{mm}$

アクリルの縦弾性係数 E は、はりの4点曲げ試験により別途求めた。その結果 $E=2.95\text{GPa}$ であった。

4. 解析方法

Fig. 4.1に有限要素法解析に用いた、モデルの要素分割例を示す。実験と同様に長さ c を変えて解析を行う。解析に使用した材料定数は、縦弾性係数 $E=2.95\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.35$ である。また、平面応力状態と仮定し、8節点アイソパラメトリック2次要素による弾性解析を行った。解析における境界条件は、図に示すように4節点を x, y 軸方向に固定し、ブロック端部より135

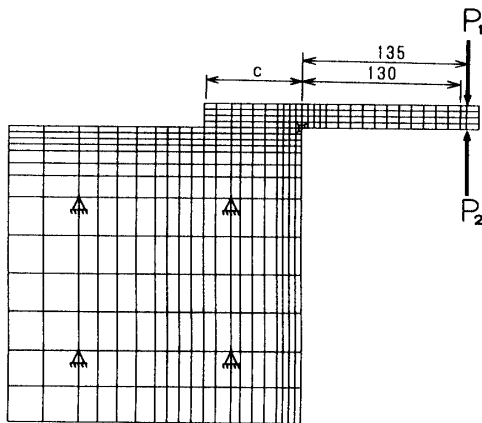


Fig. 4.1 Mesh for FEM analysis of model.

mmの位置に荷重 P_1 もしくは P_2 を加え、130mmの位置のたわみを計算する。

5. 結果および考察

5.1 接合部長さとローカルフレキシビリティの関係

本研究ではブロックを4点固定としているが、接合端部に近い固定箇所を除いた3点固定としても実験を行った。実験上、両者に差はほとんど見られず、解析上も3点固定と4点固定は同じ値を示した。そのためブロックを4点固定としたことでの、ローカルフレキシビリティに及ぼす影響は少ないといえる。

接合部長さをパラメータとした荷重とたわみの関係をFig. 5.1, Fig. 5.2に示す。図より、接合部長さ c の減

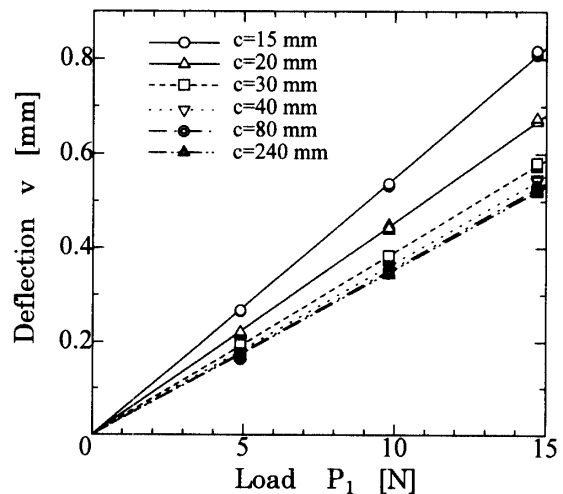


Fig. 5.1 Relation between load and deflection by adhesion model.

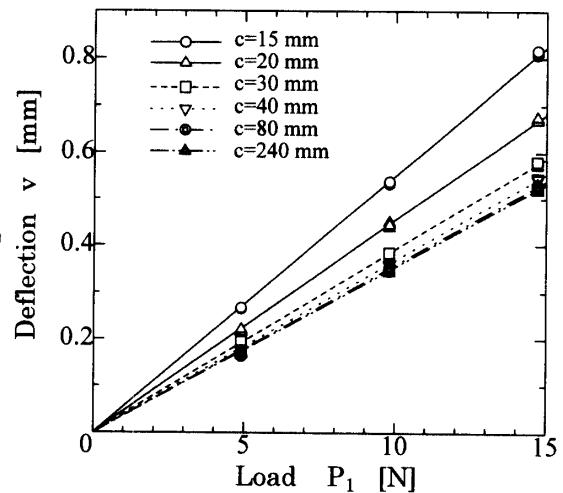


Fig. 5.2 Relation between load and deflection by solid model.

少に伴い直線の勾配が大きくなることがわかる。これは固定条件が接合部長さによって異なり、ローカルフレキシビリティが変化していることを表している。

Fig. 5.3 は接着モデルにおける、接合部長さによって変化する固定条件を表したものである。横軸は接合部長さ c を試験片板厚 h で無次元化した値 h/c を、縦軸には Fig. 5.1 における直線の勾配 $v/P_{1,2}$ を示す。図からわかるように、荷重 P_1, P_2 にかかわらず h/c が $1/2$ 以上になると $v/P_{1,2}$ が急激に増加している。すなわち、板厚に対して接合部長さが2倍以下になるとローカルフレキシビリティが増加するといえる。予想に反して荷重

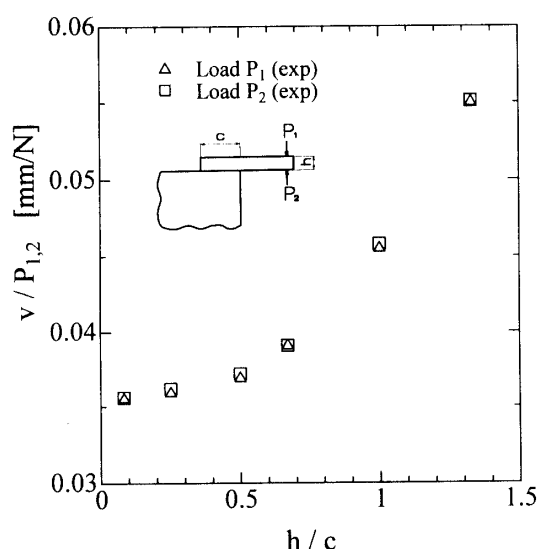


Fig. 5.3 Relation between h/c and $v/P_{1,2}$ by adhesion model.

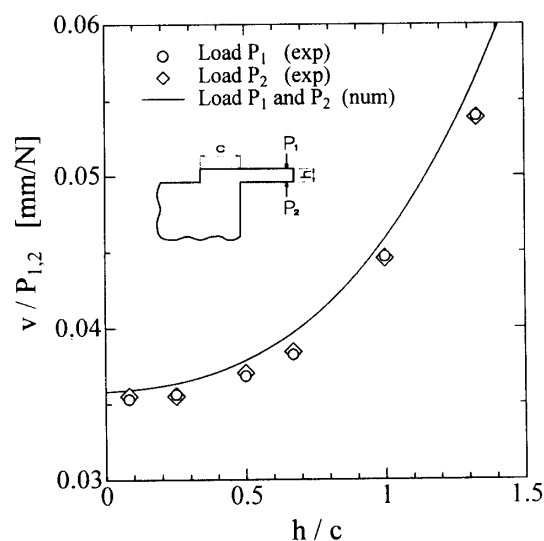


Fig. 5.4 Relation between h/c and $v/P_{1,2}$ by solia model.

方向の異なる P_1, P_2 がほぼ同じ値を示したことから、この傾向は荷重方向に依存しないことがいえる。なお、 $v/P_{1,2}$ の値の中にはローカルフレキシビリティに係わる変形のほかに、はかのたわみ分も含まれている。この分離については後述する。ただし、 $v/P_{1,2}$ のはりのたわみ分は本実験に関する限り、 h/c に関係なく一定である。

Fig. 5.4 は、一体モデルにおける h/c と $v/P_{1,2}$ の関係を表したものである。当然のことではあるが、荷重 P_1 による値と逆荷重 P_2 による値は同じであり、 h/c が $1/2$ 以上になると $v/P_{1,2}$ の増加がみられた。

また、Fig. 5.4 に示した実線は、解析による結果である。実験結果と解析結果はよく一致している。8 節点四角形要素を用いると、Fig. 4.1 のような比較的粗いメッシュでもよく合うことがわかる。

5.2 接着モデルと一体モデルの比較

Fig. 5.5 は接着モデルと一体モデルを比較した図である。 v/P_1 の増加がみられる $h/c=1/2$ を境に、一体モデルに比べ接着モデルのローカルフレキシビリティがわずかに大きくなることがわかる。これは、接着により板厚不連続部のローカルフレキシビリティがさらに追加されているためであると考えられる。しかしながら、本研究では一体モデルと接着モデルに大きな差は見られなかった。これは、本研究で使用したシアノアクリレート系接着剤の接着層が薄いためであり、接着層が厚い場合や接着材の種類が異なればこの結果は変わると考えられる。少なくとも、本研究では $h/c=1/2$ 以下の接着による板厚不連続部のローカルフレキシビリティは、考慮する必

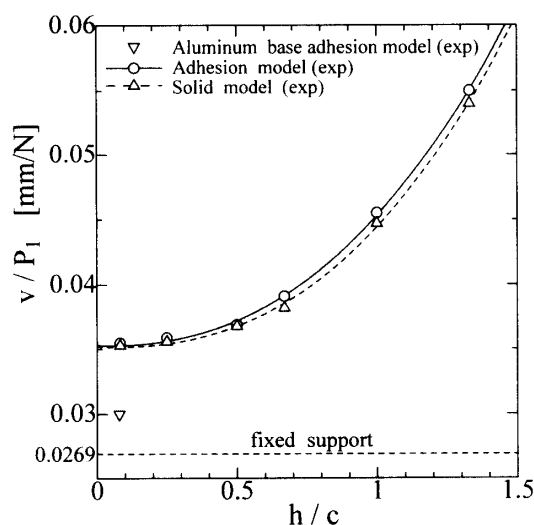


Fig. 5.5 Comparison between adhesion model and solid model.

要がないといえる。

また、完全固定状態での片持ちはりの v/P_1 は、せん断応力によるたわみも含めた理論式より 0.0269mm/N であった⁴⁾。ローカルフレキシビリティが非常に小さく、完全固定状態に近づくのではないかという考えに基づき用意したアルミベース接着モデルの v/P_1 は 0.0300mm/N であることから、本試験片においても完全固定ではなく、わずかに 0.0031mm/N のローカルフレキシビリティが発生していることがわかる。一体モデルにおいて c の長さを大きくして $h/c=0$ まで曲線を延長すると v/P_1 は 0.0352mm/N と推測されるため、1/4無限板においても完全固定ではなく、はりのたわみ分 0.0269mm/N を差し引くと 0.0083mm/N のローカルフレキシビリティが発生することがわかる。

5.3 ローカルフレキシビリティの評価

はりのたわみの理論値 0.0269mm/N を使用し、はりの固定部分に生じる、ローカルフレキシビリティによる固定端の傾き $\Delta\theta$ について検討する。

ここでローカルフレキシビリティの逆数の意味を持つ基礎係数 K を導入する。

$$K = M/\Delta\theta \quad (5.1)$$

M : 単位幅当たりの曲げモーメント

$$(M = PL/b)$$

$$\Delta\theta = x/a \quad (5.2)$$

x : 固定理論値とのたわみの差

また、 K の無次元量を次式で表す。

$$\zeta = K/Eh^2 \quad (5.3)$$

同様に c に関する無次元量を次式で表す。

$$\xi = h/c \quad (5.4)$$

この ξ と ζ の関係を示したものが Fig. 5.6 である。

この図より、 ξ を与えれば ζ が求められ、固定端のローカルフレキシビリティを定量的に評価することができる。

一方、1/2無限板については、固定部分のローカルフレキシビリティによる傾き $\Delta\theta$ は、平面応力状態とすれば式 (5.5) より求めることができる²⁾。

$$\Delta\theta = \frac{16.67M}{\pi Eh^2} + \frac{(1-\nu)V}{Eh} \quad (5.5)$$

$\nu=0.35$ とすれば $\zeta=0.185$ である。本研究は1/4無限板であり、Fig. 5.6 より推測すると1/4無限板の場合 $\xi=0.125$ となる。1/2無限板と1/4無限板とを比較すると ξ の値で 0.060 の差が生じており、1/4無限板の方が ξ は小さいので、ローカルフレキシビリティは大きいことがわかる。

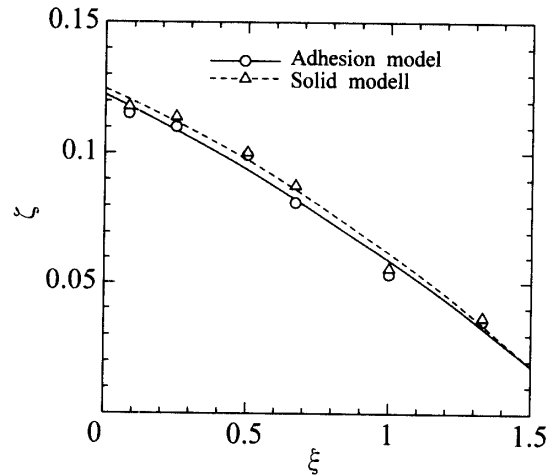


Fig. 5.6 Relation between ξ and ζ .

6. 結 言

本研究では、固定条件の異なる1/4無限板に取り付けたはりのたわみを測定し、接着接合界面近傍の変形について実験および解析により検討を行い、以下の結果が得られた。

- (1) 接着接合固定部分に発生するローカルフレキシビリティは、シアノアクリレート系接着剤を用いた本実験に関する限り、接合面の有無にかかわらず荷重方向に依存しない。
- (2) 接着モデル、一体モデル共に板厚に対して接合部長さが2倍以下になると、ローカルフレキシビリティの増加が顕著に表れる。また、その点を境に接着モデルのローカルフレキシビリティが一体モデルよりわずかに増加するが、全体的に見て両者に大差はない。
- (3) 一体モデルにおけるローカルフレキシビリティは、8節点四角形要素によるFEM解析により求めることが可能である。
- (4) 接着モデル、一体モデル共に局部変形が生じるため、はりの支持条件が完全固定にならない。その支持条件を表す方法として、ローカルフレキシビリティの逆数の意味をもつ基礎係数 K を導入し、 K の無次元量 ζ と無次元量 ξ (板厚 h /接合部長さ c) との関係を示した。この関係より ξ を与えると ζ が求められ、ローカルフレキシビリティを定量的に求めることができる。

参考文献

- 1) 日本機械学会調査研究分科会成果報告書, 「マイク

- ロデバイスの熱・強度問題」日本機械学会 (1993).
- 2) W. J. O'Donnell: J. Appl. Mech. **27** (1960) 461.
- 3) 志田 茂, 栗津原博: 日立評論 Vol. **51** (1969) 873.
- 4) S. Timoshenko and J.N. Goodier, "Theory of Elasticity" McGraw-Hill (1951).