中間層を有する異種接合材の界面端近傍の特異応力分布[†]

井岡 誠司* 増田 敬二** 久保 司郎*

Singular Stress Distributions near the Edge of Interface of Bonded Dissimilar Materials with an Interlayer

by

Seiji IOKA*, Keiji MASUDA** and Shiro KUBO*

For bonded dissimilar materials, the free-edge singular stress fields usually prevail near the intersection of free-surface and the interface. When two materials are bonded by welding or by using an adhesive, an interlayer or an adhesive layer may develop between two bonded materials. An interlayer may be inserted between two materials to defuse the residual stress. Stress field near the intersection of the interface and free-surface in the presence of the interlayer is then very important to evaluate the strength of bonded dissimilar materials.

In this study, to investigate the effect of the interlayer on the stress distribution on the interface, stress distributions on the interface of bonded dissimilar materials with an interlayer were calculated by using the boundary element method. Relation between the free-edge singular stress fields of bonded dissimilar materials with and without an interlayer were investigated numerically. It was found that the influence of the interlayer on the stress distribution was limited within a small area of the order of interlayer thickness around the intersection of the interface and the free-surface when the interlayer is very thin. Stress distribution near the intersection of the interface and free-surface was controlled by the free edge stress singularity of the bonded dissimilar materials without the interlayer. The interlayer in this condition can be called free-edge singularity controlled-interlayer.

Key words: Bonded dissimilar materials, Interface, Free-edge stress singularity, Interlayer, Boundary element method

1 緒 言

異なる二つの材料を接合・複合化することによりそれぞれの材料の欠点を補い、強度・機能を向上させた材料を作り出すことがなされている。^{1), 2)}

材料を接合した場合に生じる重要な問題として、接合界面と自由縁が交わる点の近傍において、

$$\sigma = Kr^{-p} \quad (1)$$

の形で表される自由縁特異応力場の存在が挙げられる。ここで、 σ は応力、 r は界面端からの距離、 K は特異応力場の強さ、 p は特異性の指数である。この自由縁応力特異性が存在するため、界面端が異種接合材の破壊の起点となることが考えられる。

自由縁応力特異性については古くから研究がなされている。^{3)~5)} また、材料の組合せ、あるいは接合界面と自由縁が交わる角度を変えることによって特異性が消失させることが可能であるということが知られている。^{6)~10)}

さて、二つの材料を接着剤を用いて接合した場合、接合された材料どうしが接することなく接合に用いた接着剤が接着層として存在することになる。また、セラミックスと金属を接合すると、線膨張係数の差のため、接合時に熱残留応力が生じる。そこで、両者の中間の線膨張係数を持つ材料を挿入して熱残留応力を軽減するという

ことが行われる。このような中間層の厚さが十分に薄い場合には、界面上の応力分布は中間層を除く接合材料の組合せによる力学環境の影響下にあるものと考えられる。

本研究では、中間層が存在する異種接合材料について、界面上の応力分布の境界要素解析¹¹⁾を行い、中間層の存在が界面上の応力分布、特に界面端近傍の応力分布に与える影響について検討を行い、中間層がない場合に生じる自由縁応力特異性との関係を調べる。

2 解析対象

境界要素解析に用いた解析対象を Fig. 1 に示す。解析対象として、材料1と材料2の間に材料3を中間層として挟みこんで接合する場合を考えた。材料1および2は幅を $2W$ 、高さを $1.5W$ で固定し、材料3の厚さ h を変化させて解析を行った。また、接合界面と自由縁は直交しているものとする。解析対象の上端には一様な引張応力 σ_0 を負荷し、下端の長手方向(y 方向)変位を0とした。解析はすべて平面ひずみ条件のもとで行った。

材料1と材料2、材料1と材料3、および材料2と材料3の組合せに対する自由縁応力特異性の指数をそれぞれ p_{12} 、 p_{13} および p_{23} とする。中間層の挿入により、(1) 特異性が厳しくなる場合、(2) 特異性が緩やかになる場合、すなわちこれらの自由縁応力特異性の指数の間に、

[†] 原稿受理 平成15年11月18日 Received Nov. 18, 2003

* 正会員 大阪大学大学院工学研究科機械システム工学専攻 〒565-0871 吹田市山田丘, Dept. of Mech. Eng. and Systems, Graduate School of Eng., Osaka Univ., Yamadaoka, Suita, 565-0871

** 大阪大学大学院 〒565-0871 吹田市山田丘, Graduate Student, Osaka Univ., Yamadaoka, Suita, 565-0871

Fig. 1. Model used for B. E. M. analyses.

- (1) $0 < p_{12} < p_{13}, p_{23}$
- (2) $0 < p_{13}, p_{23} < p_{12}$

の関係が成り立つような2つの材料定数の組合せについて検討を行った。用いた材料定数の組合せを Table I に示す。また、応力関数の固有関数展開により求めたそれぞれの材料の組合せに対する自由縁応力特異性の理論値^{6), 7)}を Table II に示す。なお、本研究では材料1と材料3の界面を界面13, 材料2と材料3の界面を界面23と呼ぶことにする。

3 境界要素解析結果

3・1 $0 < p_{12} < p_{13}, p_{23}$ の場合

Table I の組合せのうち、中間層を挿入することにより、界面端の特異性が材料1と材料2を直接接合した場合の特異性よりも強くなる、すなわち p_{13} と p_{23} が p_{12} よりも大きくなる材料の組合せ1について検討を行った。界面13および界面23上の垂直応力 σ_{yy} の分布をそれぞれ

Table I. Material properties used for B. E. M. analyses.

		Material 1	Material 2	Material 3
1	Young's modulus (GPa)	206.0	70.3	4.93
	Poisson's ratio	0.30	0.345	0.33
2	Young's modulus (GPa)	100.0	1.0	20.0
	Poisson's ratio	0.30	0.30	0.30

Table II. Theoretical values of exponent of free-edge stress singularity.

	p_{12}	p_{13}	p_{23}
1	0.09336	0.28226	0.23925
2	0.26770	0.05978	0.23915

れ Fig. 2 (a) および (b) に示す。横軸には界面端からの距離 r を板幅の半分 W で無次元化した値、縦軸には界面上の垂直応力を σ_0 で無次元化した値を用いている。中間層の厚さと W の比 h/W を 0.002, 0.005 および 0.01 の3通りに変えて解析を行った。また、図中の実線は $h = 0$, すなわち材料3をはさんでいない場合の界面上の応力分布を示している。

Fig. 2 に示した解析結果より、材料3をはさんでいない場合の応力分布は両対数線図上で r/W が 10^{-2} より小さい領域で良好な直線性を示しており、べき関数型の特異性を示していることがわかる。また、Fig. 2 (a) から材料3をはさんだ場合について、界面13上においても、 $h = 0$ の場合に特異性の存在している $r/W < 10^{-2}$ の領域より小

(a) Distributions on interface 13

(b) Distributions on interface 23

Fig. 2. Stress distributions on interfaces 13 and 23 for pair 1.

さな $r/W = 0.001$ 程度以下の小さい範囲では応力分布は良好な直線性を示しており、界面端近傍においてべき関数型の特異性を示していることがわかる。特異応力場が支配的な範囲は h が小さくなるにつれて小さくなっている。中間層が存在する場合の界面端近傍の応力分布はどの h の値に対しても中間層がない場合の応力分布よりも厳しい特異性を示しており、図中に示した傾き p_{13} の直線にほぼ等しい傾きを示していることがわかる。また、 r が h よりも大きい範囲では、応力分布は中間層がない場合の分布と一致している。このことから、中間層が存在することによる応力分布への影響は界面端から中間層厚さ h 程度の範囲内に限られることがわかる。

Fig. 2 (b) の界面 23 上の分布では、界面端近傍の傾き p_{23} を持つ直線部が見られないが、境界要素解析の要素分割を細かくすることによって界面 13 上の分布と同様に中間層との間の特異性が現れるものと考えられる。

中間層の厚さ h が $0.01W$ 以下と十分小さい場合、界面端の応力場は、中間層をはさまずに接合した場合の界面端の応力場に支配されると考えられる。このような状態は、自由縁特異場支配中間層と名づけることができる。そこで、以下のような検討を行った。Fig. 2 に実線で示した中間層をはさまない場合の界面上の応力分布について、界面端近傍の応力分布は

$$\sigma_{yy} = K_{y0} r^{-p_{12}} \quad (2)$$

の形で表される。このため、 r が h 程度の位置の応力は $K_{y0}h^{-p_{12}}$ 程度となる。そこで、Fig. 2 に示した中間層をはさんだ場合の界面上の応力分布について、横軸には界面端からの距離 r を h で無次元化した値、縦軸には応力を $K_{y0}h^{-p_{12}}$ で無次元化した値を用いて整理した結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、 $r/h < 1.0$ の範囲では h の値に拘わらず応力分布は同じ線上にのっている。このことから、中間層が存在する場合、 $r/h < 1.0$ の範囲において、 $\sigma_{yy}/K_{y0}h^{-p_{12}}$ は r/h の関数として表すことができる。すなわち、

$$\frac{\sigma_{yy}}{K_{y0}h^{-p_{12}}} = f_{13}\left(\frac{r}{h}\right) \quad (3)$$

の形で表すことができる。図のように、関数 f_{13} は r/h の減少とともに極大値と極小値をとったのち、 p_{13} の傾きで増大する。また、Fig. 3 (a) から、 $r/h < 10^{-1}$ の界面端近傍において、 h の値に拘わらず応力分布を、両対数線図上でひとつの直線により表すことができる。すなわち、

$$\frac{\sigma_{yy}}{K_{y0}h^{-p_{12}}} = C_{y13}\left(\frac{r}{h}\right)^{-p_{13}} \quad (4)$$

の形で表すことができる。ここで、 C_{y13} は定数であり、Fig. 3 (a) において r/h が小さな部分の直線部の延長線が $r/h = 10^0$ の線と交わる点における $\sigma_{yy}/(K_{y0}h^{-p_{12}})$ の値により与えられる。一方、界面端近傍の特異場は

$$\sigma_{yy} = K_{y13}r^{-p_{13}} \quad (5)$$

となる。ここで、式 (5) 中の K_{y13} は中間層をはさんだときの、界面 13 上の無次元化した界面端特異応力場の強さである。式 (4) および (5) より、 K_{y13} は

$$K_{y13} = K_{y0}C_{y13}h^{p_{13}-p_{12}} \quad (6)$$

(a) Distributions on interface 13

(b) Distributions on interface 23

Fig. 3. Normalized stress distributions on interfaces 13 and 23 for pair 1.

により与えられ、この式より $p_{13} > p_{12}$ の場合には h が小さくなるほど特異性の強さ K_{y13} は小さくなる。

Fig. 3 (b) の界面 23 上の分布では界面端近傍において直線性を示している部分が見られないが、境界要素解析において界面端近傍の要素分割を細かくすることによって界面 13 の場合と同様の結果が得られるものと考えられる。この場合にも式 (3) から (6) において添字 13 を 23 に置き換えることにより次の関係が成立するものと考えられる。すなわち、 $r/h < 1.0$ の範囲において

$$\frac{\sigma_{yy}}{K_{y0}h^{-p_{12}}} = f_{23}\left(\frac{r}{h}\right) \quad (7)$$

また、界面端近傍においては C_{y23} を定数として

$$\frac{\sigma_{yy}}{K_{y0}h^{-p_{12}}} = C_{y23}\left(\frac{r}{h}\right)^{-p_{23}} \quad (8)$$

界面端近傍の特異場は、特異性の強さを K_{y23} として

$$\sigma_{yy} = K_{y23}r^{-p_{23}} \quad (9)$$

となる。式 (8) と式 (9) から K_{y23} は

$$K_{y23} = K_{y0}C_{y23}h^{p_{23}-p_{12}} \quad (10)$$

となる。

3・2 $0 < p_{13}, p_{23} < p_{12}$ の場合

Table I の組合せ 2 の場合、すなわち中間層を挿入することにより、界面端の特異性が材料 1 と材料 2 を直接接合した場合の特異性よりも弱くなる材料の組合せについて界面上の応力分布を求めた。結果を Fig. 4 に示す。

(a) Distributions on interface 13

(b) Distributions on interface 23

Fig. 4. Stress distributions on interfaces 13 and 23 for pair 2.

(a), (b) はそれぞれ界面 13, 界面 23 上の分布を示している。図において、縦軸には界面上の垂直応力 σ_{yy} を σ_0 で無次元化した値を用い、横軸には界面端からの距離 r を界面の半幅 W で無次元化した値を用いている。図中の実線は材料 3 をはさまずに材料 1 と材料 2 を直接接合した場合の界面上の応力分布を示している。

Fig. 4 より、材料 3 をはさまない場合の応力分布は、両対数線図上で良好な直線性を示しており、べき関数型の特異性を示していることがわかる。界面 13 上の分布は、 $r > h$ の範囲では中間層がない場合とほぼ同じ分布を示しており、前節での結果と同じように、中間層が存在することによる影響は界面端から中間層厚さ程度の範囲内であることがわかる。また、応力の値は界面端に近づくにつれて一旦 $h = 0$ の場合よりも大きな値をとってから、実線よりも緩やかな傾きを示しながら単調に増加している。界面端近傍において応力分布が直線性を示している範囲の傾きは図中に示した p_{13} の傾きを持つ直線とほぼ同じであることがわかる。界面 23 については、実線で示された分布とほぼ同じ応力分布を示している。これは $p_{12} = 0.27803$ に対して、 $p_{23} = 0.23915$ とほぼ同じ特異性の指数を持っていることによると考えられる。

次に、横軸に r/h 、縦軸に $\sigma_{yy}/K_{y0}h^{-p_{12}}$ の値を用いて界面上の分布を表した結果を Fig. 5 に示す。(a), (b) はそれぞれ界面 13 および界面 23 上の分布を示している。図より、 $r/h < 1.0$ の界面端近傍では h の値に拘わらず同じ分布を示している。すなわち、前節でも示した場合と同じように、 h が十分小さい場合、界面端近傍における応力分布は h の値によらず、式 (3) の形で整理することができる。このとき、関数 f_{13} および f_{23} は r/h の減少とともに単調に増大する傾向を示している。また、 r/h が小さい範囲では界面 13 上では式 (4) から (6)、界面 23 上では式 (8) から (10) の関係が成立すると考えられる。

式 (3) および式 (6) を用い、また $r \gg h$ の領域の応力分布が $h = 0$ の応力分布にほぼ等しいことを用いれば、 h のある値に対する解析結果があれば、他の h に対する応力分布を推定することができる。

なお、本研究では接合界面上の垂直応力のみを取り扱っているが、界面強度を評価する場合には垂直応力とせん断応力の両方を考慮する必要がある。ただし、本研究で取り扱った解析の範囲内では接合界面上においてせん断応力は垂直応力に比べはるかに小さく、垂直応力のみを用いて強度評価を行った結果とせん断応力も含めて評価を行った結果の間には大きな差が生じないと考えられる。

また、接合界面と自由縁が直交している異種接合材において、接合界面上の垂直応力 σ_y とせん断応力 τ_{xy} は、互いに独立したパラメータではなく、次式のような関係がある。¹²⁾

$$\tau_{xy} = F\sigma_y \quad (11)$$

ここで、 F は材料定数によって決定されるパラメータである。このことから、本研究で示した垂直応力に対する評価方法は、せん断応力に対しても適用が可能であると考えられる。

(a) Distributions on interface 13

(b) Distributions on interface 23

Fig. 5. Normalized stress distributions on interfaces 13 and 23 for pair 2.

本研究では中間層との界面端に特異性が生じる場合について論じたが、適当な中間層を挿入することにより自由縁特異性を消失させることができることが著者ら¹³⁾により報告されている。特異性を消失させるための材料の

判別法および特異性消失下の応力分布の特性も論じられている。

4 結 言

異種接合材料に別の材料を中間層として挿入したときの界面上の応力分布の特性について検討を行った。すなわち、接合界面上の応力分布の境界要素解析を行い、得られた応力分布について、中間層の厚さ、および中間層がない場合の力学環境の影響を調べた。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 中間層をはさんだ場合の応力分布は、界面端から中間層厚さ程度離れると、中間層をはさまない場合の応力分布と同じ分布を示す。すなわち、中間層をはさんだことによる応力分布への影響は、界面端から中間層厚さ程度の範囲内に限定される。

(2) 中間層の厚さが板幅の 1/100 以下と非常に薄い場合、界面端近傍の応力場は中間層がない場合の自由縁特異応力場に支配される。この状態を自由縁特異場支配中間層と名づけた。この性質を用いると、ある層の厚さ h に対する界面上の応力分布が得られていれば、 h の異なる場合の界面上の応力分布を推定することができる。特異性の強さも提案した式により簡単に推定できる。

参 考 文 献

- 1) 結城良治, “界面の力学”, p.1 (1993) 培風館.
- 2) 岩本信也, 須賀唯知, “セラミックス接合工学”, p.1 (1990) 日刊工業新聞社.
- 3) D. B. Bogy, J. Appl. Mech., **35**, 460 (1968).
- 4) D. B. Bogy, J. Appl. Mech., **38**, 377 (1971).
- 5) J. Dundurs, J. Appl. Mech., **36**, 650 (1969).
- 6) 久保司郎, 大路清嗣, 日本機械学会論文集, A-57, 632 (1991).
- 7) 大路清嗣, 久保司郎, 中井善一, 井岡誠司, 材料, **41**, 1389 (1992).
- 8) 陳 玳珩, 西谷弘信, 日本機械学会論文集, A-58, 457 (1992).
- 9) 陳 玳珩, 日本機械学会論文集, A-62, 1862 (1996).
- 10) 井上忠信, 日本機械学会論文集, A-62, 2726 (1996).
- 11) 結城良治, 木須博行, “境界要素法による弾性解析”, p.17 (1987) 培風館.
- 12) 許 金泉, 武藤睦治, 日本機械学会論文集, A-65, 160 (1999).
- 13) 井岡誠司, 増田敬二, 久保司郎, 日本機械学会 M&M 2003 材料力学部門講演会講演論文集, No.03-11, 1085 (2003).