無次元特異応力場の強さを用いた板状接合試験片に対する 界面上の平均はく離応力の推定

Estimation of Average Delamination Stress on Interface
for Bonded Strips Using Non-dimensional Intensity of Stress Singularity

○正 倉橋 貴彦 (長岡技科大) 大島 知士 (長岡高専) 伊部 和貴 (長岡高専)
学 渡辺 裕太郎 (長岡高専専攻科) 正 近藤 俊美 (長岡高専) フェロー 古口 日出男 (長岡技科大)

Takahiko Kurahashi, Nagaoka University of Technology, 1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata,
Satoshi Oshima, Nagaoka National College of Technology, 888, Nishikataai, Nagaoka, Niigata,
Kazuki Ibe, Nagaoka National College of Technology, 888, Nishikataai, Nagaoka, Niigata,
Yutaro Watanabe, Advanced Course of Nagaoka National College of Technology, 888, Nishikataai, Nagaoka, Niigata,
Toshimi Kondo, Nagaoka National College of Technology, 888, Nishikataai, Nagaoka, Niigata,
Hideo Koguchi, Nagaoka University of Technology, 1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata

Key Words: Average Delamination Stress on Interface, Akin Singular Element, Stress Analysis,
Intensity of Stress Singularity, Dissimilar Material Joints, Order of Singularity

1. は じ め に

本研究では、アルミニウム接着接合試験片に対する引張はく離試験と試験片モデルに対する応力解析により、界面上における平均はく離応力と応力特異場の強さの関係について考察を行う。引張はく離試験では、接着層厚みを変えたモデルに対して引張試験を行い、はく離荷重を計測した後、はく離荷重を接着界面における断面積で割ることにより界面上における平均はく離応力を求める。また、応力解析より得られる界面上における応力分布より特異応力場の強さを求め、界面上における平均はく離応力と特異応力場の強さの関係式を誘導する。一般に、特異応力場の強さは、距離の指数乗の単位を含むものであり、この指数の値は特異性のオーダーと呼ばれ、材料の組み合わせや接合端部の形状により変わるものである。そこで、接合材料の種類や端部の形状に依らず界面上における平均はく離応力を推定できるように、特異応力場の強さに対しては無次元化の処理を行う。応力解析は有限要素法により行い、特異点を含む要素には Akin の特異要素^{[1],[2],[3]}を適用する。また、特異性のオーダーの算定には Bogy の特性方程式^[4]を用いる。

2. 引張はく離試験

図 1 に示すアルミニウム接着接合試験片を用いる。接着層厚さ t は 0.4mm, 0.7mm, 1.2mm の 3 種類に対して 4 回ずつ行った引張試験に対してはく離荷重を整理する。図 2 にはく離荷重 F と接着層厚さ t の関係を示す。結果より接着層厚みが薄くなるに従い、はく離荷重が大きくなっていることがわかる。

Fig.1 Specimen model for tensile test

Fig.2 Relationship between delamination force and adhesive layer thickness

3. 特異応力場の強さの計算

応力解析は、Akin の特異要素を用いた有限要素法により行う。材料定数を表 1 に、また解析モデルを図 3 に示す。アルミニウムと接着材の界面端近傍における特異性のオーダーを Bogy の特性方程式により求めると $\lambda=0.19329$ と求まる。この値を特異要素に用いて、有限要素法により応力解析を行う。接着層厚さ t が 0.4mm, 0.7mm, 1.2mm の場合に対して応力解析を行うと、界面端近傍における応力成分 σ_{yy} の分布は図 4 のように得られる。図中に示す線は $\lambda=0.19329$ の値を用いて、特異場における応力成分 σ_{yy} の分布を $\sigma_{yy}=K_{yy}r^{-\lambda}$ とした場合のフィッティング結果であり、接着層厚みが薄いほど界面端における応力成分 σ_{yy} の値は小さくなる傾向を示す。このフィッティングにより得られた特異応力場の強さ K_{yy} と接着層厚さ t の関係を示すと図 5 のようになる。接着層厚さ t が厚くなるに従い、特異応力場の強さ K_{yy} の値は大きくなる傾向を示している。

Tab.1 Material properties

	Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν
Aluminum	70.60	0.340
Resin	1.94	0.252

Fig.3 Computational model (upper : computational model, lower : finite element mesh around singular point)

Fig.4 Distribution of stress component σ_{yy} from singular point on interface for each adhesive thickness

Fig.5 Relationship between adhesive layer thickness t and intensity of stress singularity K_{yy}

ここで、各接着層厚さ t のモデルに対して、はく離荷重 F と特異応力場の強さ K_{yy} の関係を整理すると図 6 のようになる。結果より、今回の試験モデルに対しては、はく離荷重 F と特異応力場の強さ K_{yy} の間には線形の関係があることがわかる。ここで、特異応力場の強さ K_{yy} の値をどの接合モデルに対する指標としても使用できるように、境界から加える外力 $\sigma_{External-force}$ 、試験片の幅 w および接着層厚さ t により無次元化の処理を行う (式(1), (2))。ここに、試験片の幅 b により無次元化した特異応力場の強さを K_{w-yy} とし、着層厚さ t により無次元化した特異応力場の強さを K_{t-yy} とする。また、はく離荷重も界面の面積の大きさにより異なるため、界面上における平均はく離応力 σ^* を計算し、界面上における平均はく離応力 σ^* と無次元化した特異応力場の強さを K_{w-yy} の関係を図 7 の上に、また界面上における平均はく離応力 σ^* と無次元化した特異応力場の強さを K_{t-yy} の関係を図 7 の下に示す。結果より界面上における平均はく離応力 σ^* と無次元化した特異応力場の強さを K_{w-yy} の関係は線形の関係を示すことに対して、界面上における平均はく離応力 σ^* と無次元化した特異応力場の強さを K_{t-yy} の関係は線形式の様な単純な式では表せない結果となった。図 7 の下に示す結果は、無次元化をする際に使用した距離の次元を持つパラメータ (接着層厚さ t) が個々の無次元化の計算の際に変わるため、その事が直接特異応力場の強さの無次元化に影響を与えたためと考えられる。図 7 の上の結果について線形式によるフィッティングを行うと、 $\sigma^* = -38.438K_{w-yy} + 25.607$ の関係式により与えられることがわかった。

Fig.6 Relationship between intensity of stress singularity K_{yy} and delamination force F

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_{External-force}} &\approx \frac{K_{yy}}{\sigma_{External-force}} r^{-\lambda} \\ &= \frac{K_{yy}}{\sigma_{External-force}} \frac{w^{-\lambda}}{w^{-\lambda}} r^{-\lambda} \\ &= \frac{K_{yy} w^{-\lambda}}{\sigma_{External-force}} \left(\frac{r}{w}\right)^{-\lambda} \quad \dots (1) \\ &= \frac{K_{yy} 25.0^{-0.19329}}{1.0} \left(\frac{r}{25.0}\right)^{-0.19329} \\ &= K_{w-yy} \left(\frac{r}{25.0}\right)^{-0.19329} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_{External-force}} &\approx \frac{K_{yy}}{\sigma_{External-force}} r^{-\lambda} \\ &= \frac{K_{yy}}{\sigma_{External-force}} \frac{t^{-\lambda}}{t^{-\lambda}} r^{-\lambda} \\ &= \frac{K_{yy} t^{-\lambda}}{\sigma_{External-force}} \left(\frac{r}{t}\right)^{-\lambda} \quad \dots (2) \\ &= \frac{K_{yy} 25.0^{-0.19329}}{1.0} \left(\frac{r}{t}\right)^{-0.19329} \\ &= K_{t-yy} \left(\frac{r}{t}\right)^{-0.19329} \end{aligned}$$

Fig.7 Relationship between average delamination stress on interface σ^* and non-dimensional intensity of stress singularity K_{wyy} and K_{tyy}
(upper : Relationship between σ^* and K_{wyy} ,
lower : between σ^* and K_{tyy})

4. おわりに

本研究では、アルミニウム接着接合試験片の接着層厚さに対するはく離荷重の変化を調べ、応力解析により得られる特異応力場の強さとの関係について考察を行った。応力解析においては、Akinの特異要素を用いた有限要素法を適用し、界面上において得られた界面端近傍における応力分布より特異応力場の強さの値を求めた。特異応力場の強さの単位を境界から加える外力 $\sigma_{External-force}$ および試験片の幅 w により無次元化し、また界面上における平均はく離応力 σ^* の関係を整理したところ、 $\sigma^* = -38.438K_{w-yy} + 25.607$ という線形の関係式が得られた。この関係式を使用することで、事前に対象となるモデルに対して応力解析を行い無次元化された特異応力場の強さを求めておくことで、界面上における平均はく離応力が推定できると思われる。今後は、接合材料の種類を変えて引張はく離試験を行い、他の接合モデルに対して、本研究で誘導した関係式の適用可能性を調べる必要があると考えている。

謝辞

本研究を行うにあたり科学研究費補助金(若手(B))25820015および(基盤(B))26289003の援助を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] Akin, J.E., The generation of elements with singularities, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.10, pp.1249-1259, 1976.
- [2] 王樹波, 白鳥正樹, 于強, Akin 特異要素による異材接合端部における特異応力場の評価, 日本機械学会論文集 A 編, 63, 606, pp.322-327, 1997.
- [3] 倉橋貴彦, 渡辺裕太郎, 近藤俊美, 古口日出男, 三次元特異性オーダを用いた Akin 特異要素による異材接合体の界面端角部近傍における特異応力場の評価(四面体要素と特異要素使用時の結果の比較), 日本機械学会論文集, 80, 809, pp.1-18, 2014.
- [4] Bogy, D.B., Two Edge-Bonded Elastic Wedges of Different Materials and Wedge Angles under Surface Traction, *Journal of Applied Mechanics*, 38, pp.377-386, 1971.