引張荷重を受ける同種被着体段付き重ね合わせ接着継手の
三次元有限要素法解析と強度推定*市川 幸平^{*1}, 進 祐一郎^{*2}, 沢 俊行^{*3}A Three-dimensional Finite Element Stress Analysis and
Strength Estimation of Stepped-lap Adhesive Joints
of Similar Adherends Subjected to Static Tensile LoadingsKohei ICHIKAWA, Yuichiro SHIN^{*4} and Toshiyuki SAWA^{**} Graduate of Engineering, Hiroshima University,
1-4-1 Kagamiyama, Higashihiroshima-shi, Hiroshima, 739-8527 Japan

Stress distributions in stepped-lap adhesive joints subjected to static tensile loadings are analyzed using a three-dimensional finite-element method (FEM). For establishing an optimum design method of the joints, the effects of adhesive Young's modulus, the adhesive thickness and a number of steps on the interface stress distributions are examined. As the results, it is found that the maximum value of the maximum principal stress σ_1 occurs at the butted edge of the adhesive interfaces. The maximum value of σ_1 decreases as the adhesive Young's modulus and the number of steps increase, and as the adhesive thickness decrease. In addition, the difference in the stress distributions between the 2-D and 3-D FEM calculations was shown. A method for estimating the joint strength is proposed using the interface stress distributions. For verification of the FEM calculations, experiments were carried out to measure the strains of the adherends and the joint strengths. Fairly good agreements are found between the numerical and the experimental results.

Key Words: Stress Analysis, Finite-element Method, Stepped-lap Adhesive Joints, Joint Strength, Static Tensile Loadings

1. 緒 言

近年の接着剤の高性能化に伴い、接着継手が機械構造物などに数多く用いられるようになってきた。しかし、接着継手は種々の継手形態に対して継手内応力分布、特に接着界面応力分布が不明確であり、応力分布と強度の関係が十分に明らかでない。このため、接着継手の強度特性の明確化と体系化が必要であるといわれている。基本的な接着継手形態としては、単純重ね合わせ継手^{(1)~(9)}、突合わせ継手^{(10)~(13)}、スカーフ継手⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾および段付き重ね合わせ継手⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾などであるが、この中でも段付き重ね合わせ継手は接着層が突合せ部と重ね合わせ部から構成され、強度の面で優れた継手形状であり実用上重要な接着継手形態の一つであると推測されている。森、杉林⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾らはこの継手に関して二次元解析により応力分布を明らかにし、継手の有用性を示している。しかし、二次元解析のみで

接着層の厚さ方向に生じると予想される特異応力は考慮されていない。継手の特性把握と強度推定のためには三次元的なより詳細な応力解析が必要であると思われる。三次元解析に関しては鈴木ら⁽²⁰⁾⁽²¹⁾のスカーフ接着に関する有限要素法を用いた研究はなされているが、段付き接着継手に関してはなされていない。

そこで本研究では、静的引張荷重を受ける段付き重ね合わせ接着継手の接着界面における応力分布を有限要素法(FEM)を用いた三次元弾性解析(有限要素コード ANSYS)により明らかにすることを目的としている。この解析に基づき被着体と接着層の縦弾性係数、接着層厚さ、段数およびスカーフ角が接着界面の応力分布に及ぼす影響および特異応力について検討する。さらに、接着剤の応力-ひずみ線図を用いて三次元弾塑性 FEM 解析を行い、得られた結果を基に継手強度の推定を行う。また、ひずみゲージを用いたひずみ測定実験および継手破壊荷重測定実験を行い、解析結果と比較・検討し、解析結果の妥当性を示す。

2. 三次元 FEM 解析

図 1 は三次元 FEM 解析モデルを示す。座標軸は荷重作用方向を y 軸方向とし、原点 O とする直交座標系 (x, y, z) を用いる。接着される二つの被着体は同

* 原稿受付 2007 年 5 月 24 日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所オートモティブシステムグループ
(〒312-8503 ひたちなか市大字高場 2520)。^{*2} 学生員、広島大学大学院工学研究科(〒739-8527 東広島市
鏡山 1-4-1)。^{*3} 正員、フェロー、広島大学大学院工学研究科。

E-mail: sawa@mec.hiroshima-u.ac.jp

一材料・寸法とし、被着体および接着剤の縦弾性係数およびポアソン比はそれぞれ E_1, ν_1, E_2 および ν_2 とする。段付き重ね合わせ接着継手は突合せ部 (x 軸方向接着層, butt) と重ね合わせ部 (y 軸方向接着層, lap) から構成されており、本研究では継手の段数 N を突合せ部の数とする。継手の幅を w 、厚さを t とし、突合せ部長さを l_1 、重ね合わせ部長さを l_2 とする。FEM 解析は継手の対称性を考慮し、継手の厚さ方向 (z 軸方向) に対して、継手の 1/2 部分を解析対象とする。境界条件は、継手の下端面全体を y 方向に、下端面中央部を x 方向に拘束し、上端面に一様分布引張応力 σ_0 を与える。また、対称面を z 軸方向に拘束する。解析に用いた材料定数は実験に用いたそれらと対応させた。図 2 は有限要素分割の一例を示す。継手の z 方向に 10 分割し、総要素数および総節点数はそれぞれ 107 360 および 120 417 とした。最小要素寸法は基本的に $5 \mu\text{m}$ とする。

図 3 は接着剤の応力-ひずみ線図を示す。接着剤の

Fig. 1 A model for FEM calculations (the case of $N=3$)

Fig. 2 Example of mesh divisions in FEM ($w=32 \text{ mm}$, $t=9 \text{ mm}$, $l_1=10.7 \text{ mm}$, $l_2=9.3 \text{ mm}$, $t_1=t_2=0.1 \text{ mm}$, $N=3$)

応力-ひずみ測定実験は JIS の圧縮試験片を用い、材料試験機による圧縮試験を行った。実線は測定結果を示す。測定結果(実線)に対して三次元弾塑性 FEM 解析では破線で示す断片線形二直線近似した応力-ひずみを用いている。この結果を基に接着継手の破壊強度の推定を行う。弾塑性解析においては、接着層内の要素において最大主応力の最大値が、接着剤の破壊応力 σ_c に達したときその要素は破壊したと考え、このとき作用させた応力値 σ_0 を破壊強度として継手強度の推定を行う。

3. 実験方法

3.1 ひずみ測定実験 FEM 解析結果の妥当性を確認するため、継手のひずみ測定実験を行う。図 4 は実験に用いた試験片の形状および寸法を示す。被着体は軟鋼 SS 400 (JIS) を、接着剤は常温硬化形エポキシ系構造用接着剤(住友 3M 製: Scotch-Weld 1838)を用いる。被着体はワイヤカットで加工後(平均接着面粗さ $R_a=0.397 \mu\text{m}$, $R_z=2.965 \mu\text{m}$)、接着の前処理として、ブタノン ($\text{C}_2\text{H}_8\text{COCH}_3$) を用いて脱脂、洗浄し、常温硬化形エポキシ系構造用接着剤(住友 3M 製: Scotch-Weld 1838)により接着した。常温で 24 時間放置し硬化させ、電気炉により 60°C で 2 時間加熱しキュアリングを行った。図 5 は実験装置の概略およ

Fig. 3 Stress-strain curve of the adhesive

Fig. 4 Dimensions of specimen

びひずみゲージの貼付け位置を示す。ひずみ測定実験では、図5に示すように試験片にピンを通し、ジグに取り付けることにより材料試験機による圧縮荷重を引張荷重 P に変換する。このとき引張荷重 P は被着体および接着剤が降伏しない程度の荷重(弾性域)とし $P=980\text{ N}$ とした。この際、荷重作用方向(y 軸方向)ひずみ ε_y をひずみゲージ(ゲージ長さ 1 mm)により検出し、出力は動ひずみ計を介して X-Y レコーダに記録させた。ひずみゲージは、図5に示すように接着界面の両面に2枚ずつ貼付けた。

3・2 継手破壊荷重測定実験 継手強度推定結果との比較のため、継手の破壊荷重測定実験を行った。上述3・1節の継手を用い、引張荷重 P を作用させ、接着層が破断したときの引張荷重を破壊荷重 P_c とした。

4. 三次元 FEM 解析結果

4・1 接着層内における応力分布 FEM 解析モデルの寸法および材料定数は実験結果と比較するため、実験での試験片($E_1=206\text{ GPa}$, $\nu_1=0.30$)および接着剤 [$E_2=0.334\text{ GPa}$, $\nu_2=0.38$ (測定値)] と対応させて解析を行った。継手段数 N は $N=3$ とした。また、作用応力 $\sigma_0=1\text{ MPa}$ として継手の破壊に最も支配的であると考えられる応力成分、位置を調べるため以下の解析・検討を行った。

4・1・1 突合せ部および重ね合わせ部接着部における各応力成分分布 すべての要素の応力を調べた結果、 $z=0$ における応力が最も大きくなるのがわかったので以後 $z=0$ (継手表面)での応力分布を示す。図6(a)は継手の突合せ部上部接着界面(a~b, c~d, e~f)における各応力成分の分布を示す。縦軸は σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} および τ_{zx} の各応力成分の値、横軸は x 軸方向の位置 x と継手の寸法 w との比 x/w である。これより突合せ部接着界面においては荷重作用方

Fig. 5 Schematic of the experiment and the glued positions of the strain gauges

向である応力成分 σ_y が最大となり、継手の破壊に対して σ_y が最も支配的であると考えられる。図6(b)は継手の重ね合わせ部上部接着界面(b~c, d~e)における各応力成分の分布を示す。縦軸は各応力成分の値、横軸は y 軸方向の位置 y と重ね合わせ部全体の長さ L との比 y/L を示す。これより重ね合わせ部接着界面においても、荷重作用方向である σ_y が最大となっていることがわかる。しかし、重ね合わせ部に比べて突合せ部における応力の最大値がかなり大きくなり、継手の破壊は突合せ部接着界面端部から起こると考えられる。この結果は、森・杉林⁽¹⁸⁾らの行った二次元 FEM 解析結果と一致している。本研究では接着界面の応力成分の分布より σ_y が支配的であるが、強度評価に当たっては、他の応力成分を考慮して最大主応力 σ_1 で評価することとした。以降特に界面端部に発生する特異応力について応力分布の検討を行う。なお本計算例(図6の場合)での最大主応力 σ_1 の主軸方向は接着界面端部($x=0, y=0, z=0$)では $(-0.3,$

(a) At the butted adhesive interfaces

(b) At the lapped adhesive interfaces

Fig. 6 Distributions of each stress component ($\sigma_0=1\text{ MPa}$, $E_1=206\text{ GPa}$, $\nu_1=0.30$, $E_2=3.34\text{ GPa}$, $\nu_2=0.38$, $N=3$, $w=32\text{ mm}$, $L=18.4\text{ mm}$, $t=9\text{ mm}$, $l_1=10.7\text{ mm}$, $l_2=9.2\text{ mm}$, $t_1=t_2=0.1\text{ mm}$, $\theta=60^\circ$, $z=0$)

0.9, -0.3)であった。

4.1.2 接着層内部における応力分布 図7は継手の突合せ部(上部および下部接着界面, 接着層中央部)における最大主応力 σ_1 の分布を示す。縦軸は無次元化された最大主応力分布 σ_1/σ_0 , 横軸は x 軸方向の位置 x と継手の寸法 w との比 x/w である。これより接着層中央部と比較して, 接着界面における応力がより大きな値となっているため, 継手の破壊は接着界面から起こると考えられる。また, 上部および下部接着界面における応力分布の差異は極めて小さかった。このため上部接着界面における応力分布を以下に示すことにする。

Fig. 7 Normalized maximum principal stress distributions σ_1/σ_0 at the butted interfaces and middle plane ($\sigma_0=1$ MPa, $E_1=206$ GPa, $\nu_1=0.30$, $E_2=3.34$ GPa, $\nu_2=0.38$, $N=3$, $w=32$ mm, $L=18.4$ mm, $t=9$ mm, $l_1=10.7$ mm, $l_2=9.2$ mm, $t_1=t_2=0.1$ mm, $\theta=60^\circ$, $z=0$)

Fig. 8 Effects of minimum mesh size on the normalized maximum principal stress σ_1/σ_0 close to the edge ($\sigma_0=1$ MPa, $E_1=206$ GPa, $\nu_1=0.30$, $E_2=3.34$ GPa, $\nu_2=0.38$, $N=3$, $w=32$ mm, $L=18.4$ mm, $t=9$ mm, $l_1=10.7$ mm, $l_2=9.2$ mm, $t_1=t_2=0.1$ mm, $\theta=60^\circ$, $z=0$)

4.1.3 最小要素寸法が応力分布に及ぼす影響

上部接着界面端部近傍における最小要素寸法を変化させ, 要素寸法が最大主応力の値に及ぼす影響を調べた。図8はFEM解析における最小要素寸法が, 継手の上部接着界面端部近傍($z=0$, $x/w=0\sim 0.01$)における無次元化された最大主応力分布 σ_1/σ_0 に及ぼす影響を示す。接着層端部近傍における x 軸方向の最小要素寸法を $3\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ および $20\mu\text{m}$ と変化させる。 $x/w=0$ における最小要素寸法が $3\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$ の場合を比較すると, 界面端部での σ_1/σ_0 の差異は 1.4% とかなり小さくなっており, 解析時間を考慮して, 接着界面端部近傍における最小要素寸法を $5\mu\text{m}$ とすることにした。また, 理論的には $x=0$, $z=0$ では特異応力が発生し, 無限大の値となることが予想されるが, 本FEMの計算では最小要素寸法が $5\mu\text{m}$ の場合には端部から $2.5\mu\text{m}$ 離れた点での値を示してい

(a) At the upper butted adhesive interfaces

(b) Normalized stress σ_1/σ_0 close to the edge

Fig. 9 Effects of adhesive Young's modulus on normalized stress σ_1/σ_0 ($\sigma_0=1$ MPa, $E_1=206$ GPa, $\nu_1=0.30$, $\nu_2=0.38$, $N=3$, $w=32$ mm, $L=18.4$ mm, $t=9$ mm, $l_1=10.7$ mm, $l_2=9.2$ mm, $t_1=t_2=0.1$ mm, $\theta=60^\circ$, $z=0$)

る。

4・2 接着層の縦弾性係数 E_2 が応力分布に及ぼす影響 図9(a)は接着層の縦弾性係数 E_2 が継手の突合せ部上部接着界面($z=0$)における無次元化した最大主応力 σ_1/σ_0 の分布に及ぼす影響を示す。各材料定数・寸法はこれまでと同様とし、接着層の縦弾性係数 E_2 を $E_2=0.334$ GPa, 1.67 GPa, 3.34 GPa, 16.7 GPa および 33.4 GPa と変化させている。ここで $E_2=3.34$ GPa は実験で使用したエポキシ系一般構造用接着剤(住友3M製:Scotch-Weld 1838)を想定している。また図9(b)は上部接着界面端部近傍[図9(a)における $x=0, y=0$ 付近]における σ_1/σ_0 の分布を拡大して示す。これより、接着剤の縦弾性係数 E_2 が大きくなるほど上部接着界面端部近傍に発生する σ_1/σ_0 は小さくなっていることがわかる。縦弾性係数 E_2 の値が被着体の縦弾性係数 E_1 の値に近づくこ

とにより、静的引張荷重を受ける継手の強度が向上すると考えられる。他方、衝撃荷重が作用する場合では逆の特性となることが示されている⁽²²⁾。

4・3 接着層厚さ t_1 が応力分布に及ぼす影響 図10(a)は突合せ部接着層厚さ t_1 が継手の突合せ部上部接着界面($z=0$)における無次元化した最大主応力 σ_1/σ_0 の分布に及ぼす影響を示す。各材料定数・寸法はこれまでと同様とし、さらに重ね合わせ部接着層厚さ $t_2=0.1$ mm と一定として突合せ部の接着層厚さ t_1 を $t_1=0.025$ mm, 0.05 mm, 0.1 mm, 0.2 mm および 0.4 mm と変化させている。また、図10(b)は上部接着界面端部近傍[図10(a)における $x=0, y=0$ 付近]における σ_1/σ_0 の分布を拡大して示す。これより、突合せ部接着層厚さ t_1 が小さくなると、接着界面端部近傍に発生する σ_1/σ_0 の値は小さくなっていることがわかる。この結果は突合せ接着継手の場合^{(10)~(13)}

(a) At the upper butted adhesive interfaces

(b) Normalized stress σ_1/σ_0 close to the edge

Fig. 10 Effects of adhesive thickness on normalized stress σ_1/σ_0 ($\sigma_0=1$ MPa, $E_1=206$ GPa, $\nu_1=0.30$, $E_2=3.34$ GPa, $\nu_2=0.38$, $N=3$, $w=32$ mm, $L=18.4$ mm, $t=9$ mm, $l_1=10.7$ mm, $l_2=9.2$ mm, $t_2=0.1$ mm, $\theta=60^\circ$, $z=0$)

(a) At the upper butted adhesive interfaces

(b) Normalized stress σ_1/σ_0 close to the edge

Fig. 11 Effects of the number of steps on normalized stress σ_1/σ_0 ($\sigma_0=1$ MPa, $E_1=206$ GPa, $\nu_1=0.30$, $E_2=3.34$ GPa, $\nu_2=0.38$, $w=32$ mm, $L=18.4$ mm, $t=9$ mm, $l_1=10.7$ mm, $l_2=9.2$ mm, $t_2=0.1$ mm, $\theta=60^\circ$, $z=0$)

と同じ特性を示している。

4.4 段数 N が応力分布に及ぼす影響

図 11(a) は被着体の段数 N (突合せ部の数) が継手の突合せ部上部接着界面 ($z=0$) における無次元化した最大主応力 σ_1/σ_0 の分布に及ぼす影響を示す。各材料定数・寸法はこれまでと同様とし y 方向接着層である重ね合わせ部の面積を一定 (l_1, l_2 は $N=2$ に対して $l_1=16.05$ mm, $l_2=18.4$ mm, $N=3$ に対して $l_1=10.7$ mm, $l_2=9.2$ mm, $N=5$ に対して $l_1=6.45$ mm, $l_2=4.6$ mm と変化させた) として被着体の段数 N を $N=1, 2, 3$ および 5 と変化させている。また、図 11(b) は上部接着界面端部近傍 [図 11(a) における $x=0, y=0$ 付近] における σ_1/σ_0 の分布を拡大して示す。これより段数 N が大きくなると、上部接着界面端部近傍に発生する σ_1/σ_0 の値は小さくなっていることがわかる。被着体の段数 N を大きくすることにより、継手の強度が向上すると考えられる。

(a) At the upper butted adhesive interfaces

(b) Normalized stress σ_1/σ_0 close to the edge

Fig. 12 Effects of the scarf angle on normalized stress σ_1/σ_0 ($\sigma_0=1$ MPa, $E_1=206$ GPa, $\nu_1=0.30$, $E_2=3.34$ GPa, $\nu_2=0.38$, $N=3$, $w=32$ mm, $t=9$ mm, $l_1=10.7$ mm, $l_2=0.1$ mm)

4.5 スカーフ角が応力分布に及ぼす影響

図 12(a) は被着体のスカーフ角 θ が継手の突合せ部上部接着界面 ($z=0$) における無次元化した最大主応力 σ_1/σ_0 の分布に及ぼす影響を示す。スカーフ角 θ は図 12(a) に示すように被着体の突合せ部長さ w と重ね合わせ部長さ L からなる角度 θ を表し、 $\tan \theta = w/L$ である。重ね合わせ部長さ L が小さくなるほど θ は大きくなる。各材料定数・寸法はこれまでと同様とし、突合せ部の面積を一定として被着体のスカーフ角 θ を $\theta=90^\circ, 80^\circ, 60^\circ$ および 49° と変化させている。また、図 11(b) は上部接着界面端部近傍 [図 11(a) における $x=0, y=0$ 付近] における σ_1/σ_0 の分布を拡大して示す。これより、被着体のスカーフ角 θ が大きくなると、接着界面端部近傍に発生する σ_1/σ_0 の値は小さくなっていることがわかる。 θ を大きくする、すなわち重ね合わせ部長さ L を小さくすることにより、継手の強度が向上すると考えられる。また、 $\theta=90^\circ$ である突合せ接着継手では σ_1/σ_0 の値が再び大きくなることを示す。

4.6 三次元弾塑性 FEM 解析による強度推定

本解析では図 3 の接着剤の応力-ひずみ線図を二直線で近似して三次元弾塑性 FEM 解析を行い、得られた結果を基に継手の破壊強度の推定を行う。実線は実験により得られた結果を、破線は近似直線を示す。接着層内の要素が接着剤の破壊応力 $\sigma_c=50.96$ MPa (図 3) に達したときの作用応力 σ_0 を継手の破壊強度とした。図 13 は三次元弾塑性 FEM 解析により得られた、継手に静的引張応力 σ_0 [MPa] を作用させたときの突合せ部上部接着界面端部 ($z=0, x=0, y=0$) における

Fig. 13 Maximum principal stress distributions at the edge of the upper butted adhesive interfaces ($\sigma_0=1$ MPa, $E_1=206$ GPa, $\nu_1=0.30$, $E_2=3.34$ GPa, $\nu_2=0.38$, $N=3$, $w=32$ mm, $L=18.4$ mm, $t=9$ mm, $l_1=10.7$ mm, $l_2=9.2$ mm, $t_1=t_2=0.1$ mm, $\theta=60^\circ$)

最大主応力 σ_1 の分布を示す。これより、継手に $\sigma_0 = 28 \text{ MPa}$ が作用するとき、突合せ部上部接着界面端部における要素が接着剤の破壊応力 σ_c に達し、継手が破壊すると考えられる。なお、本計算における強度推定は、最小要素寸法は $5 \mu\text{m}$ とした。

5. 実験結果と FEM 解析結果の比較

本研究では三次元 FEM 解析結果の妥当性を示すため、継手のひずみ測定実験を行った。また継手破壊荷重測定実験を行い三次元弾塑性 FEM 解析による強度推定結果と比較した。

5・1 ひずみ測定実験 図 14 は継手の突合せ部接着界面(ひずみゲージ貼付け位置は図 5 に示す)におけるひずみ測定実験結果と三次元 FEM 解析結果の比較を示す。縦軸は引張荷重作用方向である y 軸方向ひずみ ε_y の値、横軸は x 軸方向の位置 x と継手の寸法 w との比 x/w である。また、実験で測定されるひずみの値はひずみゲージ全体(ゲージ長さ 1 mm)のひずみの平均値とした。そこで、三次元 FEM 解析によるひずみの値も、ひずみゲージを貼付けた部分に対応する節点のひずみを平均した値を用い、実験の値と比較した。これより、ひずみ測定実験結果と三次元 FEM 解析結果はかなりよく一致していることが示されている。

5・2 継手破壊荷重測定実験 表 1 は継手破壊荷重測定実験結果を示す。実験 5 回の破壊荷重の平均値

Table 1 Experimental results on the rupture load

	1	2	3	4	5	Average
$P_c \text{ (N)}$	7154	8036	10976	7644	7938	8350

Fig. 14 Comparisons of the strains between the calculated and experimental results

$P_c (=8350 \text{ N})$ を応力 σ_0 に換算すると $\sigma_0 = 29 \text{ MPa}$ となり、FEM 解析による推定強度 $\sigma_0 = 28 \text{ MPa}$ とかなりよく一致した。

6. 二次元解析結果と三次元解析結果の比較

二次元解析モデルでは、継手の寸法、形状は三次元解析モデル(図 2)と同様とし、総要素数および総節点数はそれぞれ 10736 および 12041 (最小要素寸法 $5 \mu\text{m}$) とした。図 15 は接着界面応力分布の二次元 FEM 解析結果と三次元 FEM 解析結果 ($z=0$) の比較を示す。二次元 FEM 解析では、平面応力状態および平面ひずみ状態について解析した。二次元 FEM 解析結果においては平面応力状態および平面ひずみ状態での σ_1/σ_0 の分布の差異は小さいが、三次元 FEM 解析結果では二次元 FEM 結果よりも σ_1/σ_0 は大きな値を

Fig. 15 Comparisons of normalized stress σ_1/σ_0 between the 2-D and 3-D FEM calculations

Fig. 16 Normalized maximum principal stress σ_1/σ_0 distribution in the z -direction ($x=0$ and $x=0.1$, $y=0$)

示した。また、三次元 FEM 解析における、継手内部の $z=t/4$ における σ_1/σ_0 の値(破線)と二次元 FEM 解析(平面ひずみおよび平面応力状態)のそれとの差異は、 $z=0$ 近傍での値を除くと 1%以下となり極めて小さいことがわかった。これより、継手表面($z=0$)以外の継手内部では平面ひずみおよび平面応力状態の結果との差異は極めて小さいといえる。図 16 は、継手の z 方向($x=0.1$, $y=0$ および $x=0$, $y=0$)での σ_1/σ_0 の分布を示す。三次元 FEM 解析では z 方向の端部、すなわち継手表面($z=0$)においても特異応力が発生するため、二次元 FEM 解析結果よりも大きな値をしている。さらに、端部 $x=0$ では x 方向の特異応力の影響により、内部に入った要素 $x=0.1$ の σ_1/σ_0 の値に比べて $z=0$ 近傍を除いて z 方向全領域にわたり大きな値を示している。

同様に二次元解析により継手強度推定を行った結果は 31 MPa となり、実験結果 29 MPa と比較すると、二次元解析による強度推定結果は、三次元解析による強度推定結果に比べて、やや危険側に推定されていることがわかる。継手の厚さを考慮した三次元 FEM 解析を用いることが、継手のより正確な強度推定においては必要であると考えられる。

7. 結 言

本研究では、静的引張荷重を受ける段付き重ね合わせ接着継手の接着界面における応力分布について、有限要素コード ANSYS を用いて三次元 FEM 解析を行い、以下の結果が得られた。

(1) 継手の突合せ部接着界面端部において、最大主応力 σ_1 の値が最大となった。また、突合せ部接着界面端部近傍において特異応力が発生していることから、継手の破壊は接着界面端部から生じるものと推測された。

(2) 接着層の縦弾性係数 E_2 を大きく、突合せ部接着層厚さ t_1 を小さく、被着体の段数 N を大きく、スカーフ角 θ ($\tan \theta = w/L$) を大きくすることにより、接着界面における最大主応力 σ_1 の最大値が減少した。

(3) 接着剤の応力-ひずみ線図を用いた三次元弾塑性 FEM 解析を行い、継手に静的引張荷重が作用する場合の継手強度を推定する方法を示し、継手強度測定実験と比較したところ解析結果とかなりよく一致し、本方法により段付き重ね合わせ接着継手の強度予測が可能であることがわかった。

(4) 三次元 FEM 解析によって厚さ方向の継手表

面($z=0$)で特異応力が発生することが示された。 $z=0$ での応力を用いた強度推定に対して二次元での強度推定は、強度をやや過大に評価することが示され、三次元解析の必要性が示された。

(5) ひずみ測定実験を行い実験結果と三次元 FEM 解析結果を比較したところ、両者はかなりよく一致し、三次元 FEM 解析結果の妥当性が示された。

文 献

- (1) Sawa, T. et al., *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 14, No. 1 (2000), pp. 43-66.
- (2) Adams, R. D. and Harris, J. A., *The Journal of Adhesion*, Vol. 12 (1988), p. 193.
- (3) Borgmeier, P. R. et al., *ASME Applied Mechanics Division*, Vol. 104 (1989), p. 151.
- (4) Goland, M. and Reissner, E., *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 11 (1944), p. 17.
- (5) Ojalvo, I. U. and Eidinoff, H. L., *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 16, No. 3 (1978), p. 204.
- (6) Nakano, K. et al., *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 11, No. 8 (1997), pp. 1039-1062.
- (7) Harris, J. A. and Adams, R. D., *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 4 (1984), p. 65.
- (8) Kato, S. et al., *Materials and Processing Conference*, Vol. 2001, No. 9 (2001), pp. 189-190.
- (9) Borellino, C. et al., *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 27, Issue. 6 (2007), pp. 446-457.
- (10) Lindsey, G. H., *Journal of Applied Physics*, Vol. 38, No. 12 (1967), p. 4843.
- (11) Nakano, Y. et al., *JSME International Journal, Series I*, Vol. 31, No. 3 (1988), pp. 507-513.
- (12) Ochsner, A. and Gracio, J., *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 27, Issue. 2 (2007), pp. 129-135.
- (13) Seo, D. W. and Lim, J. K., *Composites Science and Technology*, Vol. 65, Issue. 9 (2005), pp. 1421-1427.
- (14) Gunnion, A. J. and Herszberg, I., *Composites Structures*, Vol. 75, Issue. 1-4 (2006), pp. 364-376.
- (15) Kumar, S. B. et al., *Materials Science and Engineering A*, Vol. 412, Issue 1-2 (2005), pp. 117-122.
- (16) Kim, J. H. et al., *Composite Structures*, Vol. 66, Issue. 1-4 (2004), pp. 69-75.
- (17) Kim, H. S. et al., *Composite Structures*, Vol. 32, Issue. 1-4 (1995), pp. 593-600.
- (18) Mori, K. and Sugibayashi, T., *Solid Mechanics, Strength of Materials, JSME International Journal, Series I*, Vol. 33, Issue. 3 (1990), pp. 349-355.
- (19) Mori, K. et al., *Mechanics and Material Engineering, JSME International Journal, Series I*, Vol. 39, Issue. 3 (1996), pp. 398-406.
- (20) Suzuki, Y., *Bulletin of JSME*, Vol. 27, No. 231 (1984), pp. 1836-1845.
- (21) Suzuki, Y., *Bulletin of JSME*, Vol. 28, No. 237 (1985), pp. 392-399.
- (22) Higuchi, I. et al., *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 16, No. 12 (2002), pp. 1585-1601.