カップリングを用いた中空軸継手の
強度におよぼす接着厚さの影響*杉 林 俊 雄^{*1}, 松 尾 圭 造^{*2}
羽 太 芳 郎^{*1}, 池 上 皓 三^{*3}Effect of Adhesive Thickness on the Strength
of Adhesive Bonded Joints of Tubular Metal Shafts with CouplingToshio SUGIBAYASHI, Keizo MATSUO,
Yoshiro HABUTO, and Kozo IKEGAMI

The deformation and strength of tubular shaft joints having various adhesive thicknesses were investigated analytically and experimentally. The strain distributions of the joints with two different adhesive thicknesses under the combined tensile and torsional loads were analyzed using the finite element method. The analytical strain distributions coincided approximately with the experimental results. On experimental stress-strain curves of the joints, it was observed that the initial fracture occurred at the edge of a coupling before the joint was completely broken and that the initial cracking stress of the joint with thinner adhesive was smaller than the joint with thicker adhesive. However, the effect of adhesive thickness on the final strength was little in the case of the adhesive bonded joints of tubular metal shafts. The strength of the joints was estimated by applying the strength laws of carbon steel, the adhesive layer and their interfaces to the calculated stress distributions. The predicted results were in good agreement with the experimental results.

Key Words: Strength, Fracture, Adhesive, Tubular Shaft Joint, Initial Fracture, Final Strength, Finite Element Method, Combined Loads

1. 結 言

接着継手構造を構造部材や機械要素の結合法として用いれば、機械的締結法に比して被結合部材の強度低下がなく、かつ付加重量が少ない利点を有する。さらに、溶接および圧接などの結合法と比しても接着結合は高加熱、高加圧過程を必要としないため、接合後の寸法精度の低下が少ない特徴がある。そこで、著者らは接着継手の強度に力学的に影響をおよぼす因子として被着体の表面あらさと形状および材質、接着長さ、接着層厚さを取り上げ実験と解析の両面から、それら因子が接着継手の変形と強度に与える影響を検討してきた。これらの因子の中で、接着層厚さが接着継手の強度におよぼす影響を検討した例は突合せ継手に対する場合が多く^{(1)~(4)}、重ね合わせ継手に対する結果は極めて少ない⁽⁵⁾。そこで本報では重ね合わせ継手の中で接着層厚さを比較的容易に精度良く変化させることの可能な軸継手を取り上げ、接着層厚さが継手の変形と

強度におよぼす影響を解析と実験の両面から検討した。まず最初に、継手に引張りとおねじりの組合せで負荷を加えたときのひずみ分布を2種類の接着厚さの継手について有限要素法により解析し、その結果と実験結果とを比較し、解析に用いた境界条件の妥当性を確認した。次に、継手の強度予測を応力解析結果と強度則とを組合せて初期破損値について行った。さらに、継手の最終破断強度の予測について実験結果を基に、解析結果との比較検討を行った。

2. ひずみ分布と応力分布

2-1 解析方法 図1(a), (b)に解析に用いた継手の座標、寸法と境界条件をそれぞれ示す。解析は、図1(a)のA-A'面より上、B-B'面より右の部分に対して行った。図1(b)にA-A'面より上、B-B'面より右の断面を取り上げて、寸法と境界条件を示す。継手には、軸の端部に等分布応力の引張負荷、および、その端部外周にねじり負荷をそれぞれ加えた。変位は $z=0$ の面でカップリング部の z, θ 両方向を固定、 r 方向を自由とし、接着層との軸 z, r, θ の3方向を自由とする。なお、カップリングの両端部は接着しても、しない場合もその両者の継手の強度に差がほとんどないため、図1(a)に示す簡単なモデルにした。また、こ

* 昭和62年11月3日 北陸信越支部北陸地方学術講演会において講演、原稿受付 昭和62年4月16日。

^{*1} 正員、拓殖大学工学部 (〒193 八王子市館町815-1)。

^{*2} 准員、日本光学工業(株) (〒100 東京都千代田区丸の内3-2-3)。

^{*3} 正員、東京工業大学精密工学研究所 (〒227 横浜市緑区那賀津田町4259)。

こでの境界条件は、ひずみ分布の実験結果から決定した。計算は、 z 方向を89等分割、 r 方向を12等分割(カップリング、接着層、軸をそれぞれ4等分割)し、三角形要素を用いた有限要素法により軸対称三次元応力状態を仮定して弾性解析で行った。解析に用いたカップリング、軸および接着剤の材料定数を表1に示す。以下の解析結果では、 z, r のそれぞれの位置を $\bar{Z}=z/l, \bar{R}=r/r_0$ とし、カップリングの長さを $\bar{L}_0=l_1/r_0$ 、厚さを $\bar{R}_T=t_3/r_0$ 、軸の内外径比を $\bar{D}_R=r_1/r_0$ としてそれぞれ無次元化して表す。

2.2 ひずみ分布の比較 軸継手の応力解析は、軸継手の形状を一定($\bar{L}_0=3.1, \bar{R}_T=0.19, \bar{D}_R=0.5$)として、接着層の厚さを変化させて行った。例として、接着層厚さが0.005mmと0.1mmの場合の継手表面におけるひずみ分布を図2から図4に示す。負荷は引張りとなじりの組合せ負荷で、引張りとなじりの両負荷に対してひずみ分布を検討するためにそれらの応力比を1とし、継手の軸端部での平均引張応力 σ_z と軸の外周部でのせん断応力 $\tau_{z\theta}$ の値をそれぞれ19.6MPa(ミーゼス形相当応力 $\sigma_{eq}=39.2$ MPa)とした。これらの値はひずみ分布の測定を考慮したもので、継手の破損応力(計算値)より決定した。なお、各図において $\bar{Z}=0$ から $\bar{Z}=1.0$ の範囲がカップリング部(接

着部)である。

まず、図2の軸方向ひずみ ε_z の分布をみると、両接着層厚さの継手に対して、カップリング部でのひずみは $\bar{Z}=0$ 近傍において最大値を示し、その後、その値は $\bar{Z}=0$ から $\bar{Z}=1.0$ に向かうにしたがってその値が減少し、 $\bar{Z}=1.0$ 近傍においてその値はほぼ零となる。 $\bar{Z}=1.0$ を超えて軸の部分に入るとその値は増加し $\bar{Z}=1.3$ 近傍より平滑な分布となる。なお、カップリングと軸との境目のために $\bar{Z}=1.0$ 近傍においてひずみ分布は不連続となる。この ε_z では、接着層が厚いほうが、そのひずみが中央部($\bar{Z}=0$)近傍では大きくカップリ

表1 材料定数

	Adherend (Carbon steel)	Adhesive (Epoxy resin)
Young's modulus GPa	206	3.33
Poisson's ratio	0.33	0.34

図1 軸継手の形状、座標と境界条件

図2 カップリングと軸の軸方向での ε_z の分布

図3 カップリングと軸の軸方向での ε_θ の分布

ング端部では小さくなり、そのひずみ分布にかたよりがみられる。それに対して図3の円周方向ひずみ ϵ_θ は、両接着層厚さに対してほぼ同一の分布傾向を示し、 $\bar{Z}=0$ 近傍においてその絶対値がやや増加する傾向がみられるが、接着層全域($\bar{Z}=0$ から $\bar{Z}=1.0$)においてほぼ平滑な分布となっている。また、図4のせん断ひずみ $\gamma_{z\theta}$ は ϵ_z の分布とほぼ同様の分布傾向を示しているが、接着層厚さで比較すると ϵ_z の分布とは逆に接着層が薄いほうがそのひずみが中央部($\bar{Z}=0$)近傍では大きく、カップリング端部では小さくなっている。

両継手に引張りとねじりの組合せ荷重を負荷したときの各ひずみ成分の測定値はそれぞれ図2から図4の対応する図に示す。負荷は両継手とも多軸繰返し応力試験機により比例負荷で、軸の端部での平均引張応力

σ_z と軸の外周部でのせん断応力 $\tau_{z\theta}$ の値をそれぞれ19.6 MPaと同一の負荷(応力比 $\sigma_z/\tau_{z\theta}=1$ 、ミーゼス形相当応力 $\sigma_{eq}=39.2$ MPa)を継手に加えた。本報告に用いた試験片は機械加工後に軸とカップリングを内外径マイクロメータ(三豊製ホールテスト)により測定し、両者のクリアランスが所定の値となるように組合せた。なお、軸とカップリングの外径を同一の値とし、接着層厚さは軸とカップリングの外径を合せることにより決定した。接着層厚さは実験後、そのはく離した接着層を測定した。継手のひずみ分布は3軸の抵抗線ひずみゲージを用いて試験片表面で測定した。両継手の計算結果と実験結果のひずみ分布の傾向はほぼ一致している。

2.3 応力分布の比較 継手内に生じる応力はひ

図4 カップリングと軸の軸方向での $\gamma_{z\theta}$ の分布

図6 接着層の軸方向での σ_r の分布

図5 接着層の軸方向での σ_z の分布

図7 接着層の軸方向での τ_{rz} の分布

ずみ分布と同一の条件で計算した。その応力分布の例として接着層における応力分布を図5から図7に示す。図5の σ_z の分布は、接着層の中央部($\bar{Z}=0.5$ 近傍)では平滑な分布となっているが、その両端部で急激に応力の上昇がみられる。その応力の増加は、接着層が薄いほど顕著である。なお、 $\bar{Z}=0$ と $\bar{Z}=1.0$ の近傍において σ_z の値が負となるが、これはカップリングの中央部と端部が負荷を加えることにより軸の中心に向かってそれぞれ内外に変形するためと考えられる。また、図6と図7に示す σ_r と τ_{rz} の分布でも σ_z と同様に、接着層の両端部での応力上昇は、接着層厚さが薄いほど顕著である。

3. 継手の強度予測と実験結果

3.1 強度則 継手の強度予測は、応力解析結果と、被着体、接着層、被着体と接着層の界面のそれぞれの強度則を組合せて行った。すなわち、ある外力に対して継手各部に生じる応力値を各々の強度則に代入し、耐荷重値を超える部分があるときにその外力値をその強度とした。強度則は、被着体と接着層に対してはミーゼス条件式を、界面に対しては薄肉円筒突合せ試験片により得られる接着強度則を用いる。すなわち、被着体と接着層に対して、

$$F_a = \{\sigma_z^2 + \sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_z\sigma_r - \sigma_r\sigma_\theta - \sigma_\theta\sigma_z + 3(\tau_{z\theta}^2 + \tau_{r\theta}^2 + \tau_{rz}^2)\}^{1/2}/\sigma_y = 1 \quad (1)$$

接着界面に対して、

$$F_i = |\sigma_r/\sigma_0|^m + (\tau_{r\theta}^2 + \tau_{rz}^2)/\tau_0^m = 1 \quad (2)$$

図8 接着層厚さが0.005 mmと0.1 mmの場合の接着強度曲面

ここで、式(1)の定数は、被着体に対しては $\sigma_y=343$ MPa、接着層に対しては $\sigma_y=64$ MPaとする。接着層厚さ0.005 mmと0.1 mmの場合の接着強度曲面を図8に示す。この実験値より得られる式(2)の定数は表2に示す。

3.2 実験結果 まず、図9と図10にこの継手と同一の形状の継手に引張りとねじりの組合せ負荷を加えて、継手が破損に至るまでの変形状態を示す。図9、10の縦軸には相当応力 σ_{eq} (ミーゼス形相当応力)を示してあるが、引張りおよびねじり負荷の単独負荷に対しては σ_{eq} の値を1/2にすれば、それぞれの負荷応力となる。まず、図9の接着層厚さが0.005 mmの ϵ_z をみると、軸のFの位置($\bar{Z}=1$ 近傍)での値が $\sigma_{eq}=100$ MPa近傍より荷重が増加してもひずみ値が増加しなくなる。次にカップリングのEの位置($\bar{Z}=1$ 近傍)での値が $\sigma_{eq}=140$ MPa近傍よりその応力-ひずみ関係に異常が生じる。しかし、これら2点(E, F)の位置を除いた箇所でのカップリングの各位置A($\bar{Z}=0$)、

表2 接着強度則の定数

Adhesive thickness t_2 mm	σ_0 MPa	τ_0 MPa	m
0.005	44.1	41.2	1.80
0.01	37.2	42.4	3.54
0.05	31.5	30.8	8.66
0.1	32.5	31.0	3.36

図9 破断に至るまでの継手各部の ϵ_z の変化(接着層厚さ0.005 mm)

$B(\bar{Z}=0.25)$, $C(\bar{Z}=0.5)$, $D(\bar{Z}=0.75)$ では継手が破断するまでひずみは増加する。この継手での最終破断時の相当応力値は $\sigma_{eq}=230$ MPa ($\sigma_z=115$ MPa, $\tau_{z\theta}=115$ MPa) であった。図 10 の接着層厚さが 0.1 mm の場合の ϵ_z も同様に、継手に負荷を加えていくと軸とカップリングの E および F の位置 ($\bar{Z}=1$ 近傍) での値が $\sigma_{eq}=140$ MPa 近傍よりその応力-ひずみ関係に異常が生じる。これらのことより、継手に負荷を加えていくと $\sigma_{eq}=140$ MPa 近傍において、カップリングの端部の接着層および界面に初期破損が生じ、その後、さらに負荷を増加させると継手が破断したと考えられる。これらの結果より初期破損値と最終破断値を決定する。

次に、接着層の厚さ t_2 が 0.005, 0.01, 0.1 mm の三つの場合について、 σ_z - $\tau_{z\theta}$ 応力平面での継手各部の強度を図 11 から図 13 に示す。まず、図 11 の接着層の厚さが 0.005 mm の場合には、最も弱い箇所は接着層の端部 (A_1) であり、界面の端部 (I_1) の強度も接着層とほぼ同じである。そして、引張負荷側 (σ_z) ではカップリング (C_1)、ねじり負荷側 ($\tau_{z\theta}$) では軸 (S_1) の強度がそれらに続く。また、接着層と界面の端から 2 番めの要素 (A_2, I_2) での強度は、カップリングあるいは軸の強度より若干高い。図 12 の接着層厚さが 0.01 mm の場合も、接着層厚さが 0.005 mm の場合とほぼ同様の傾向がみられる。図 13 の接着層厚さが 0.1 mm の場合には、最も弱い箇所が接着層から界面に移動するが、それらの強度の差は小さい。またその強度は接着層厚さが薄い場合と比較して、特に引張負荷方向 (σ_z) で増加

図 10 破断に至るまでの継手各部の ϵ_z の変化 (0.1 mm) (接着層厚さ 0.1 mm)

図 11 σ_z - $\tau_{z\theta}$ の応力平面での継手各部の強度 (接着層厚さ 0.005 mm)

図 12 σ_z - $\tau_{z\theta}$ の応力平面での継手各部の強度 (接着層厚さ 0.01 mm)

図 13 σ_z - $\tau_{z\theta}$ 応力平面での継手各部の強度 (接着層厚さ 0.1 mm)

し、接着層および界面の端部から 2 番めの要素 (A_2 , I_2) との強度の差が小さくなっている。これは、接着層が厚くなるとカップリングの端部での急激な応力増加がなくなり、接着長さ方向での各応力分布が平滑になるからである。そのため、接着層と界面の端から 2 番めの要素 (A_2 , I_2) の強度は、カップリング (C_1)、および軸 (S_1) の強度と同じか、やや小さくなっている。継手の破断実験値は最終破断強度 (●) を示すが、引張りとなじりの応力比が 1 の組合せ負荷方向については、破断に至るまでの応力-ひずみ曲線により測定した初期破損強度 (○) も示す。この初期破損強度は、図 11 から図 13 の最も弱い箇所の強度予測値 (接着層 (A_1) または界面 (I_1)) とほぼ一致する。また、最終破断強度は、カップリング (C_1) または軸 (S_1) の強度とほぼ対応する。このことから、軸継手に負荷を加えていくと、まず、カップリング端部の接着層および界面で初期破損が生じ、その後の荷重増加によりカップリングまたは軸が塑性域に入ったときに、接着剤の変形が被着体 (カップリング、軸) の変形に追従できなくなり、継手が破断したと考えられる。

以上の結果により、接着層厚さが軸継手の強度におよぼす影響は、初期破損強度に対してはその影響がみられるが、最終破断強度に対してはほとんど影響はない。すなわち、接着層厚さが厚くなるほど、接着長さ方向での応力分布が平滑になるために、初期破損強度は引張方向で大きくなる。また、継手の最終破断強度については、初着体 (カップリング、軸) の強度に依存するため、接着層厚さの影響は小さい。

4. 結 言

本報告は接着層厚さが重ね合わせ接着継手の強度におよぼす影響についてカップリングを用いた中空軸継手を例に取り上げて解析と実験の両面から検討した。まず、接着層厚さを 0.1 mm と 0.005 mm の継手に引張りとなじりの組合せ負荷を加えたときのひずみ分布を有限要素法により解析し、実験結果と比較することにより解析に用いた境界条件の妥当性を確認した。次に、継手内の各応力成分の値と強度則とを組合せて、接着層厚さが継手強度におよぼす影響を検討し、その予測結果の妥当性を実験により確認した。その結果、接着層厚さが軸継手の強度におよぼす影響は、初期破損強度に対してはその影響がみられるが、最終破断強度に対してはほとんど影響はない。すなわち、

(1) 接着層厚さが厚くなるほど、接着長さ方向での応力分布が平滑になるために、初期破損強度は引張方向で大きくなる。

(2) 継手の最終破断強度については、被着体 (カップリング、軸) の強度に依存するため、接着層厚さの影響は小さい。

文 献

- (1) 中山・ほか 3 名, 接着協会誌, 15-7 (昭 54), 4.
- (2) 杉林・池上・白鳥, 接着協会誌, 17-2 (昭 56), 50.
- (3) 杉林・池上・白鳥, 接着協会誌, 17-4 (昭 56), 136.
- (4) 永弘・能野・中條, 接着協会誌, 20-5 (昭 59), 195.
- (5) 鈴木, 機論, 53-487 A (昭 62), 514.