異種金属材料の接着軸継手の強度評価*
(第2報, 軸が異種金属材料の場合)京極 秀樹^{*1}, 杉林 俊雄^{*2}, 池上 皓三^{*3}Strength Evaluation of Adhesive Shaft Joints
(2nd Report, Shafts of Dissimilar Metal)

Hideki KYOGOKU, Toshio SUGIBAYASHI, and Kozo IKEGAMI

The deformation and strength of adhesive shaft joints having shafts of dissimilar metal and a coupling of various metals was investigated both analytically and experimentally. The strain distributions of joints under combined loads were analyzed by the finite element method. The strength of joints was predicted by applying the strength criterion to the adherend, the adhesive layer and their interfaces. The analytical strain distributions were in good agreement with the experimental ones. The effects of the coupling length and thickness on the joint strength were examined. The effects of the Young's modulus of coupling on the joint strength were examined by varying the metals of coupling. The analytical results of strength coincided approximately with the experimental ones, so the joint strength could be successfully predicted by the strength criterion.

Key Words: Elasticity, Fracture, Adhesive Shaft Joint, Coupling, Combined Load, Strength Evaluation, Finite Element Method

1. 緒 言

異種金属材料を機械的締結法や溶接で接合する場合には、電気化学的腐食が生じたり、溶接が難しいなどの問題があるため、接着接合法が利用されてきている。今後、接着軸継手を工業的に利用していくためには、異種金属材料を接着接合して継手に機能性を付与することが必要である。このため、異種金属材料の軸継手の変形や強度について検討しておくことは重要である。

著者らはすでに異種金属材料の軸とカップリングからなる接着軸継手の変形と強度について報告⁽¹⁾⁻⁽³⁾してきたが、前報⁽⁴⁾では軸を同種異種材料とし、カップリングの材質を変化させた異種金属材料の接着軸継手について報告した。本報では前報⁽⁴⁾に引き続いて、接着継手の軸も異種金属材料とし、カップリングの材質を変えて、引張り、ねじりの組合せ負荷に対する継手の変形について解析と実験により検討した。さらに、

それらの結果をもとに、カップリング形状およびカップリングと軸の力学的性質が異なった接着軸継手の強度評価について検討した。

2. 組合せ負荷に対するひずみ分布

2・1 解析方法 図1(b)に、図1(a)に示す継手のA-A'面より上側の部分を取りあげて、継手の座標、寸法および境界条件を示す。継手の座標は軸方向を z 方向、半径方向を r 方向、円周方向を θ 方向とする。継手の寸法は全長を l 、軸の長さを l_1 、カップリングの長さを l_2 とする。また、軸の半径を r_0 、カップリングの厚さを r_2 とする。境界条件は軸の $z = -(l/2)$ の面において、 z, θ の両方向の変位を固定、 r 方向を自由とする。また、軸の中心において r, θ の両方向を固定、 z 方向を自由とする。荷重条件は継手の軸の右端部に等分布の引張負荷、外周にねじり負荷をそれぞれ加える。

応力解析は z 方向において、軸とカップリングのオーバーラップ部を1mmに等分割、軸のみの部分を20等分割、 r 方向において12等分割(軸、接着層、カップリングをそれぞれ4等分割)の三角形要素を用いて、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。解析に用いた軸、カップリングおよ

* 昭和62年11月21日 第949回講演会において講演、原稿受付 昭和62年5月22日。

^{*1} 正員、広島県立東部工業技術センター (〒721 福山市東深津町3丁目232-6)。

^{*2} 正員、拓殖大学工学部 (〒193 八王子市館町815-1)。

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

び接着剤の材料定数は表1に示す。以下の解析結果では、 z, r 方向のそれぞれの位置を $\bar{Z}=z/(l_2/2)$, $\bar{R}=r/r_0$, カップリングの長さを $\bar{L}_0=(l_2/2)/l$, カップリングの厚さを $\bar{R}_T=r_1/r_0$ として無次元化して表す。

2.2 解析結果 継手の応力解析は軸を炭素鋼(S45C)とアルミニウム合金とし、カップリングを黄銅とした継手について、継手全長、軸半径および接着層厚さをそれぞれ $l=178\text{ mm}$, $r_0=8.0\text{ mm}$ および $r_2=0.05\text{ mm}$ と一定として、カップリングの長さや厚さをそれぞれ変化させて行った。図2から図9に代表例として、 $l_2=50\text{ mm}$, $r_1=1.5\text{ mm}$ すなわち $\bar{L}_0=0.28$, $\bar{R}_T=0.19$ の継手に引張り、ねじりの組合せ負荷($\sigma_z/\tau_{z\theta}=1$)を加えたときの各ひずみ成分の分布を示す。これらの図において、横軸には無次元化した値 $\bar{Z}$ を示しており、 $\bar{Z}=-1.0$ から 1.0 の間がオーバーラップ部(接着部)となる。

図2および図3に接着層における各ひずみ分布を示す。 ε_z は $\bar{Z}=0$ 近傍で高い値を示し、ほぼ $\bar{Z}=0.3$ 以上および $\bar{Z}=-0.3$ 以下では平滑な分布となっている。 ε_r は $\bar{Z}=0$ 近傍で大きく変化し、 $\bar{Z}=\pm 1.0$ 近傍において急激に値が増加している。 ε_θ は $\bar{Z}=0$ 近傍でわ

表1 材料定数

	Young's modulus GPa	Poisson's ratio
Carbon steel	206	0.33
Aluminum alloy	71.5	0.34
Copper	130	0.34
Brass	100	0.35
Epoxy resin	3.33	0.34

図1 継手の座標、寸法および境界条件

ずかに変化し、他の範囲ではほぼ平滑な分布となっている。せん断ひずみ $\gamma_{rz}, \gamma_{r\theta}$ は、 $\bar{Z}=0$ および ± 1.0 近傍において大きく変化しているが、 $\gamma_{z\theta}$ は $\bar{Z}=0$ 近傍でわずかに変化し、他の範囲ではほぼ平滑な分布となっている。

図4から図9に被着体、すなわち軸とカップリングの表面近傍における各ひずみ分布を示す。これらの図

図2 接着層における z 方向の $\varepsilon_z, \varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ のひずみ分布 図3 接着層における z 方向の $\gamma_{rz}, \gamma_{r\theta}, \gamma_{z\theta}$ のひずみ分布

において、 $\bar{Z} = -1.0$ から 1.0 の間がカップリング、 $\bar{Z} = \pm 1.0$ 以上が軸に対応する。 ϵ_z は $\bar{Z} = -1.0$ から 0 の間で大きく増加し、逆に $\bar{Z} = 0$ から 1.0 の間で大きく減少している。軸の ϵ_z の値は右側のアルミニウム合金のほうが左側の炭素鋼より大きな値となっている。一方、 ϵ_r は $\bar{Z} = -1.0$ から 0 の間で大きく減少し、逆に $\bar{Z} = 0$ から 1.0 の間で大きく増加している。 ϵ_θ は $\bar{Z} = 0$ 近傍において大きく変化しており、 $\bar{Z} = -0.2$ から -0.8 の間すなわち炭素鋼の軸側ではほぼ平滑な分布となっている。せん断ひずみ γ_{rz} , $\gamma_{r\theta}$, $\gamma_{z\theta}$ はいずれも $\bar{Z} = 0$ 近傍および $\bar{Z} = \pm 1.0$ 近傍で大きく変化しているが、

$\gamma_{r\theta}$, $\gamma_{z\theta}$ ではほぼ平滑な分布がわずかな範囲で存在する。しかし、これら軸が異種金属材料の場合には、前報⁽⁴⁾の軸が同種金属材料の場合の分布に比べて、変化

図4 被着体における z 方向の ϵ_z の分布

図5 被着体における z 方向の ϵ_r の分布

図6 被着体における z 方向の ϵ_θ の分布

図7 被着体における z 方向の γ_{rz} の分布

図8 被着体における z 方向の $\gamma_{r\theta}$ の分布

が大きい。

2.3 解析結果と実験結果の比較 継手に引張り、ねじりの組合せ負荷を加えたときのひずみ分布の測定は球面座を用いたジグと多軸繰返し応力試験機⁽¹⁾により行った。継手の軸端部での平均引張応力 σ_z と上端部でのせん断応力 $\tau_{z\theta}$ をそれぞれ 19.5 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 $\sigma_{eq}=39$ MPa) を組合せて加えたときの測定結果をそれぞれ対応する図に示す。これらの図からわかるように、実験結果と解析結果はよく一致している。このため、解析に用いた境界条件は妥当と考えられる。

図 10 および図 11 に引張り、ねじりの組合せ負荷 (応力比 $\sigma_z/\tau_{z\theta}=1$) を増加させていき、継手が破断するまでの 8 個所のひずみの変化を測定した結果を示す。縦軸には加えた応力、横軸にはひずみ $\varepsilon_z, \varepsilon_\theta$ を示す。これらの図より、ひずみ $\varepsilon_z, \varepsilon_\theta$ はカップリングの中央部付近で、40 MPa 近傍から大きく変化し始めることがわかる。これは、継手の中央部付近から破損し始め、クラックが進展して行き最終破断を生じることを示唆している。

3. 継手の強度予測および実験結果

3.1 強度則 継手の強度予測は著者らがすでに報告^{(1)~(4)}している方法で行った。これは継手を被着体、接着層および界面にわけ、継手の強度をそれぞれの強度則を用いて予測する方法である。すなわち、被着体と接着層の強度則はそれぞれミーゼスの条件式であり、被着体に対して、

$$F_1 = [\sigma_z^2 + \sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_z\sigma_r - \sigma_r\sigma_\theta - \sigma_\theta\sigma_z + 3(\tau_{z\theta}^2 + \tau_{r\theta}^2 + \tau_{rz}^2)]^{1/2} / \sigma_{01} = 1 \quad (1)$$

接着層に対して、

図 9 被着体における z 方向の $\gamma_{z\theta}$ の分布

$$F_2 = [\sigma_z^2 + \sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_z\sigma_r - \sigma_r\sigma_\theta - \sigma_\theta\sigma_z + 3(\tau_{z\theta}^2 + \tau_{r\theta}^2 + \tau_{rz}^2)]^{1/2} / \sigma_{02} = 1 \quad (2)$$

と表せる。

接着強度則は薄肉円筒突合せ試験片により、引張りとなねじり負荷の組合せ応力下で求めた実験式で、界面に対して、

$$F_3 = |\sigma_r/\sigma_{04}|^m + |(\tau_{rz}^2 + \tau_{r\theta}^2)^{1/2}/\tau_{01}|^m = 1 \quad (3)$$

とした。ここで、強度則式(1)~(3)の定数 $\sigma_{01}, \sigma_{04}, \tau_{01}$ および m は表 2 に示す値である。また、接着層 (エポ

図 10 破断に至るまでの ε_z の変化

図 11 破断に至るまでの ε_θ の変化

キシ樹脂) に対する値は 64 MPa である。

3・2 強度予測結果 継手の強度予測は継手各部の強度分布と強度式(1)～(3)とを組合せて行った。図 12 に引張り、ねじりの組合せ負荷 ($\sigma_z/\tau_{z\theta}=1$) を加えた場合の継手における強度予測値を軸、カップリング、接着層およびそれらの界面について模式的に示す。図中に示す強度予測値は軸の端部に加えることができる応力をそれぞれ引張応力 σ_z およびせん断応力 $\tau_{z\theta}$ で示してある。また、ここでの予測値は継手に負荷を加えたときに生じる初期破損応力である。この継手においては、接着層の右端部ならびにカップリングとの界面、また中央部近傍の接着層ならびにカップリングとの界面における値が低い。これは、初期破損がこれらの位置から発生することを示唆している。また、前報⁽⁴⁾の軸が同種金属材料の場合と比較して、この場合には軸の一方がアルミニウム合金であるため、この部分は低い値となっている。これは、この軸が小さい負荷で塑性変形することを示唆している。

図 13 に軸を炭素鋼として、カップリングの材質を炭素鋼、銅およびアルミニウム合金に変化させた場合のカップリング長さに対する継手強度の変化を示す。前報⁽⁴⁾で述べたように、継手各部の強度の最低値を示す要素とその隣りの要素の値の平均値を継手強度としており、ここでは接着層の値を示している。図 13(a) に示す $\bar{R}_T=0.19$ の場合には、カップリングの材質がいずれの場合にも、 $\bar{L}_0$ が増加するほど、強度は増加し

ている。前報⁽⁴⁾の軸が同種金属材料の場合と比較すると、この場合には $\bar{L}_0$ が 0.3 までの範囲では継手強度が一定となる範囲が存在しない。図 13(b) に示す $\bar{R}_T=0.38$ の場合には、カップリングがいずれの場合にも、 $\bar{L}_0$ が増加するほど継手強度はわずかに増加しており、その増加の割合は $\bar{R}_T=0.19$ の場合よりかなり小さい。

カップリングの材質による継手強度の相違をみると、 $\bar{R}_T=0.19$ の場合には、カップリングがアルミニウム

表 2 強度則の定数

	σ_{01} MPa	σ_{04} MPa	τ_{01} MPa	m
Carbon steel	343	31.5	308	8.66
Aluminum alloy	69	41.2	41.2	200
Copper	78	47.1	44.2	1.26
Brass	118	508	482	1.05

図 12 継手の強度分布 ($\bar{L}_0=0.28$, $\bar{R}_T=0.19$)

図 13 カップリング長さに対する継手強度の変化

ム合金、炭素鋼、黄銅、銅の順に大きくなっているが、それぞれの強度の差は小さい。また、 $\bar{R}_T=0.38$ の場合には、カップリングの材質によらずほぼ同じ値をとっている。前報⁽⁴⁾の軸が同種金属材料の場合には、 $\bar{R}_T=0.19$ で軸とカップリングの弾性係数が近いほど継手強度が大きくなることを報告している。しかし、軸が異種金属材料の場合には、軸の2種類の材料とカップリングの材料との関係で、上述したようにひずみ分布が複雑になっており、このため強度分布も複雑になり、軸が同種金属材料の場合のような一定の関係が得られなかったと考えられる。

図14に軸を炭素鋼として、カップリングの材質を炭素鋼、銅、黄銅およびアルミニウム合金に変化させた場合のカップリング厚さに対する継手強度の変化を示す。図14(a)の $\bar{L}_0=0.28$ と図14(b)の $\bar{L}_0=0.14$ の場合を比較すると、図13において示したように、 $\bar{L}_0=0.28$ の継手の方が $\bar{R}_T$ のすべての範囲において強度がかなり大きい。また、 $\bar{L}_0=0.28$ 、 $\bar{L}_0=0.14$ の両方の継手とも、カップリング炭素鋼の場合には、ほぼ $\bar{R}_T=0.15$ 近傍で強度が最大となり、他のカップリングの場合には、ほぼ $\bar{R}_T=0.2$ 近傍で最大となっている。これは、前報⁽⁴⁾の軸が同種金属材料の場合と同様に、カップリングの材質すなわち弾性係数に対する、継手強度が最大となる最適なカップリング厚さが存在することを意味している。

3.3 強度予測結果と実験結果の比較 図13および図14に軸を炭素鋼として、カップリングを炭素鋼、銅、黄銅およびアルミニウム合金に変化させた場合の、それぞれカップリング長さおよび厚さに対する継手強度の実験値も示す。図13(a)および図14(a)に示す実験値のうち、カップリングが銅の継手についてはカップリングが破断した場合の値である。また、カップリングが黄銅の継手については図10および図11から求めた初期破損値と最終破損値を示している。図13(a)に示す $\bar{R}_T=0.19$ の場合には、 $\bar{L}_0=0.14$ の実験値はアルミニウム合金の場合を除いて、予測値とほぼ一致している。しかし、 $\bar{L}_0=0.28$ の実験値は予測値より大きい値となっている。図13(b)に示す $\bar{R}_T=0.38$ の場合には、実験値は予測値と一致している。

図14(a)に示す $\bar{L}_0=0.28$ の場合には、 $\bar{R}_T=0.19$ の実験値は予測値より大きい値となっているが、 $\bar{R}_T=0.38$ の実験値は予測値とほぼ一致している。図14(b)に示す $\bar{L}_0=0.14$ の場合には、 $\bar{R}_T=0.19$ の実験値はアルミニウム合金の場合を除いて、予測値とほぼ一致している。 $\bar{R}_T=0.38$ の実験値は予測値とほぼ一致している。

これらの実験結果のうち、 $\bar{L}_0=0.28$ 、 $\bar{R}_T=0.19$ の場合に実験結果が予測値より大きな値となっている。これは、 $\bar{L}_0$ が大きい場合には、図13(a)および図14(a)に示すカップリングが黄銅の継手のように、初期破損が生じた後、最終破断が生じるまで荷重が増加するためと考えられる。さらに、軸の一方がアルミニウム合金であるため、図12に示すように低負荷で塑

図14 カップリング厚さに対する継手強度の変化

性変形する。強度予測は弾性解析で行っているため、応力値を大きく見積もり、このため強度予測値が低くなったと考えられる。このため、特に低強度材料の場合には、弾塑性解析を用いて強度予測を行う必要があると考える。

また、 $\bar{L}_0=0.28$, $\bar{R}_r=0.38$ の継手, $\bar{L}_0=0.28$, $\bar{R}_r=0.19$ の継手および $\bar{L}_0=0.14$, $\bar{R}_r=0.38$ の継手の場合には、カップリングの厚さが厚いあるいはカップリングの長さが短いために、破壊形態が異なり、初期破損が生じた後、最終破断が生じるまで時間的に非常に短くなり、荷重の増加が非常に小さくなったと考えられる。このため、初期破損を予測している解析結果と実験結果がほぼ一致したと考えられる。このように、初期破損値と最終破断値がほぼ一致する結果は、すでに報告している単純重ね合せ継手⁽⁵⁾、スカーフ継手⁽⁶⁾の場合においても、特に接着長さが短い場合に同様の結果を得ている。

図15に引張り、ねじりの組合せ負荷 ($\sigma_z/\tau_{z\theta}=1$) を加えた場合の、カップリングをそれぞれ炭素鋼、銅、黄銅およびアルミニウム合金に変化させた継手 ($\bar{L}_0=0.28$, $\bar{R}_r=0.19$) の破断面を示す。カップリングが炭素鋼の場合には、右側のアルミニウム合金の軸側から破壊している。銅の場合には、カップリングの銅の中央部から破断している。アルミニウム合金および黄銅の場合には、左側の炭素鋼の軸側から破壊している。このように、ある軸とカップリングの組合せによっては、カップリングが破断する場合が存在する。すなわち、被着体の強度まで継手強度を向上させることができる。

4. 結 言

本報では、被着体に異種金属材料の軸と各種金属材料のカップリングを用いた接着軸継手に引張りとなじりの組合せ負荷を加えたときの継手の変形と強度について解析と実験の両面から検討した。被着体には炭素鋼、銅、黄銅およびアルミニウム合金、接着剤にはエポキシ樹脂を用いた。まず、継手に引張りとなじりの組合せ負荷を加えたときの継手内のひずみ分布を有限要素法により解析した。次に、継手内に生じる各部の応力値と強度則を組合せて、カップリングの長さや厚さとが継手強度に及ぼす影響を検討し、その予測結果の妥当性を実験により確めた。また、カップリングの材質が継手強度に及ぼす影響についても検討した。以上の結果をもとに、次のような結論を得た。

(1) 軸が異種金属材料の継手のひずみ分布は、軸が同種金属材料の継手に比べて、カップリングの端部

(a) 炭素鋼

(b) 銅

(c) 黄銅

(d) アルミニウム合金

図15 継手の破断面 ($\bar{L}_0=0.28$, $\bar{R}_r=0.19$, 軸: 炭素鋼-アルミニウム合金)

および中央部において変化が非常に大きい。

(2) カップリング長さに対する継手強度の変化をみると、軸が同種金属材料の場合には、継手強度が一定となる $\bar{L}_0$ の範囲が存在するが、軸が異種金属材料の場合には、 $\bar{L}_0$ が0.3までの範囲では、 $\bar{L}_0$ が増加するにつれて、継手強度も増加する傾向にある。

(3) カップリング厚さに対する継手強度の変化をみると、軸が同種金属材料の場合と同様に、カップリングの材質すなわち弾性係数に対して、継手強度が最大となる最適なカップリング厚さが存在する。

(4) $\bar{L}_0=0.28$, $\bar{R}_r=0.19$ の場合、カップリングが銅の継手では、カップリングが破断した。このように、継手の形状あるいは材質によっては被着体の強度まで継手強度を向上することができる。

なお、本研究の一部は文部省科学技術研究費(奨励A)により行った。ここに記し関係各位に謝意を表する。

文 献

- (1) 杉林・池上, 機論, 51-461, A (昭60), 302.
- (2) 杉林・池上, 機論, 51-462, C (昭60), 314.
- (3) 杉林・松尾・池上, 機論, 52-480, A (昭61), 2038.
- (4) 京極・杉林・池上, 本論文集1390ページ.
- (5) 京極・杉林・池上, 機論, 52-476, A (昭61), 1050.
- (6) 京極・杉林・池上, 機論, 53-487, A (昭62), 506.