GFRP 中空軸と炭素鋼軸の接着継手の強度設計*

(第1報, 引張負荷とせん断負荷の組合せの場合)

松尾 圭造**, 杉林 俊雄***, 池上 皓三***

Strength Design of the Adhesive Joint Connecting a Carbon Steel Shaft to a GFRP Tube (1st Report, A Case of Combined Tensile and Torsional Loads)

by Keizo MATSUO, Toshio SUGIBAYASHI, and Kozo IKEGAMI

The strength of joints between a carbon steel shaft and a glass fiber reinforced plastic (GFRP) tube connected with adhesive resin was investigated analytically and experimentally. The stress distributions under the combined tensile and torsional loads were calculated using the finite element method. It was shown that stress concentrations occurred at the edges of the overlap between two shafts. The strains measured by the strain gauges on the surface of the shaft joints were in close agreement with the calculated results. The strength of the adhesive shaft joint was predicted by applying the strength laws of GFRP, carbon steel, the adhesive layer and their interfaces to the calculated stress distributions. The predicted strength of the adhesive shaft joint under the combined loads was in good agreement with the experimental results of the initial cracking load.

Key Words: Strength, Adhesive Joint, Carbon Steel Shaft, GFRP Tube, Finite Element Method, Combined Loads

1. 緒 言

最近, 機械要素の軽量化のために, ガラス繊維強化プラスチック (以下 GFRP と呼ぶ) が, 広く利用されている。GFRP 製の機械要素は, 単独で利用されることは少なく, 金属と結合して利用されることが多い。それらの結合に, 接着結合法を用いれば, 機械的締結要素を用いた場合と比較して, GFRP の強度低下がなく, かつ, 付加重量が小さいという大きな利点が生じる。従来, GFRP と金属との接着軸継手に関する研究は, 有限要素法を用いた解析的検討が多く⁽¹⁾⁽²⁾, 実験的検討を行ったものは少ない。また, それらの多くは, ねじり負荷に対するもので, 引張負荷や組合せ負荷に対する研究は, ほとんど見当たらない。

そこで, 本研究では, GFRP と炭素鋼との接着軸継手を取り上げ, 被着体の弾性率, 異方性などの接着強度に影響を及ぼすと考えられる因子の中から軸継手の寸法が強度に与える影響について, 検討した。まず, 接着軸継手に, 引張負荷, ねじり負荷, および, それ

らの組合せ負荷を加えた場合の, 変形と応力分布とを有限要素法により解析した。次に, それらの解析結果と強度則とを組合せて, 軸継手の強度予測を行った。さらに, これらの解析結果と予測結果の妥当性を, 実験により検討した。

2. 試験片・実験方法

図1に, 実験に用いた試験片の断面図を示す。結合部分に段のある炭素鋼軸と GFRP 中空軸を接着結合したもので, 接合部における, 炭素鋼部と GFRP 部との断面積比, および, 接着長さを種々に変化させて, 解析と実験を行った。負荷条件は, 引張負荷, ねじり負荷, および, それらの組合せ負荷である。炭素鋼は S45C, 接着剤は常温硬化形エポキシ樹脂である。GFRP 中空軸は, 繊維として平織グラスクロス (日東紡 WL-230 N-16), 樹脂として常温硬化形ビニルエステル樹脂 (昭和高分子・リポキシ R-802) を用い, ハン

図1 試験片の形状

* 昭和61年4月1日 第63期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和60年4月26日。

** 学生員, 東京工業大学大学院 (〒227 横浜市緑区長津田町4259)。

*** 正員, 東京工業大学精密工学研究所。

ドレイアップ法により成形した。また、GFRP 中空軸は、軸方向と円周方向に繊維が入り、直交異方性を持つ。表1に、繊維および樹脂の機械的性質を、表2に、GFRP⁽³⁾、炭素鋼、接着剤の材料定数を示す。GFRPの体積含有率 V_f は、ほぼ0.5である。

3. 組合せ負荷に対する応力解析

3.1 解析方法 応力計算は、図2に示すような座標、および、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、弾性解析で行った。負荷は、GFRP 端部での変位を、 z 方向と θ 方向で固定し、引張負荷を炭素鋼端部に等分布荷重で、ねじり負荷を炭素鋼端部の外周に集中荷重で加えた。以下では、各パラメータを無次元化して考える。軸方向(z 方向)の位置を $\bar{z}=z/l_2$ 、半径方向(r 方向)の位置を $\bar{r}=r/r_0$ 、接合部での軸継手全体に対する炭素鋼部の断面積比を $\bar{S}=(r_3/r_0)^2$ 、接着長さを $\bar{L}=l_2/r_0$ とした。

3.2 応力分布 断面積比 $\bar{S}=0.563$ 、接着長さ $\bar{L}=2.0$ の軸継手に、ミーゼス相当応力 $\sigma_{eq}=19.5$ MPa、炭素鋼端部における軸方向平均負荷応力 σ_{az} と外周部でのせん断負荷応力 $\tau_{az\theta}$ との応力比が1.0の組合せ負荷を加えた場合の応力分布を例として示す。

図3から図8が、軸方向での各応力成分の分布を示

す。これらの図で、 $\bar{z}=0\sim1$ の間が、接着部である。まず、軸方向応力 σ_z の分布を図3に示す。炭素鋼と接着剤においては、接着部の両端近傍での値が大きい。GFRPでは、接着部のGFRP端部になる $\bar{z}=1$ で、応力値は零に収束するが、接着部の炭素鋼端部になる $\bar{z}=0$ の近傍での値が特に大きい。図4と図5に示す半径方向応力 σ_r と円周方向応力 σ_θ の分布では、GFRPと接着剤との応力分布の傾向が同一である。また、接着部の炭素鋼端部近傍で、応力の符号が逆になり、その値も大きい。炭素鋼では、接着部のGFRP端部近傍での応力値が大きい。炭素鋼とGFRPにおいては、接着部から、それぞれの端部へ向かって、応力値は零に収束する。せん断応力 τ_{rz} , $\tau_{r\theta}$ の分布を図6と図7に示す。接着部では、その両端部を除いて、GFRP、炭素

図2 軸継手の座標と要素分割

図3 軸継手における応力 σ_z の分布

表1 繊維および樹脂の機械的性質

		Fiber	Matrix
		E-GLASS	RIPOXY R-802
Young's modulus	GPa	72.5	3.50
Shear modulus	GPa	29.5	1.29
Poisson's ratio		0.23	0.355
Density	g/cm ³	2.54	1.134
Tensile strength	MPa	1470	64.5
Compressive strength	MPa	—	82.7

表2 材料定数

		GFRP	Carbon steel	Adhesive resin
E_z, E_θ	GPa	9.98	206	3.33
E_r	GPa	7.56		
$G_{rz}, G_{r\theta}$	GPa	1.60	77.4	1.24
$G_{z\theta}$	GPa	3.22		
$\nu_{rz}, \nu_{r\theta}$		0.156	0.33	0.34
$\nu_{z\theta}$		0.105		

E_z, E_θ, E_r : Young's modulus
 $G_{rz}, G_{r\theta}, G_{z\theta}$: Shear modulus
 $\nu_{rz}, \nu_{r\theta}, \nu_{z\theta}$: Poisson's ratio

鋼, 接着剤の応力値が, 全く同じになる。また, GFRP では負の方向に, 炭素鋼では正の方向に, 応力値が大きい。図8に示すせん断応力 $\tau_{z\theta}$ は, 接着剤で, ほぼ平滑な分布になる。GFRP においては, 接着部での値はほぼ零であるが, 接着部の炭素鋼端部になる $\bar{z}=0$ 近

傍での値が大きい。炭素鋼では, 接着部の炭素鋼端部になる $\bar{z}=0$ から, 接着部の GFRP 端部になる $\bar{z}=1$ に向かって, 応力が増大するが, $\bar{z}=1$ の位置を過ぎると, 値は急激に減少する。以上のことより, すべての応力成分が, 接着部の少なくとも一方の端部におい

図4 軸継手における応力 σ_r の分布

図6 軸継手における応力 τ_{rz} の分布

図5 軸継手における応力 σ_θ の分布

図7 軸継手における応力 τ_{θ} の分布

て、応力値が大きくなる。

3.3 ひずみ分布 ひずみ分布は、軸継手の形状、および、負荷条件を、応力分布のときと同一にし、球面座を用いた治具と多軸応力試験機を用いて、抵抗線ひずみゲージにより、 ε_z , ε_θ , $\gamma_{z\theta}$ の3成分について測定した⁽⁵⁾。図9から図11に、測定結果、および、有限要素法による解析結果を示す。実験結果の分布傾向は、解析結果とほぼ一致している。

4. 軸継手の強度評価

4.1 強度則 軸継手の強度評価は、軸継手を構成する四つの部分に分けて行った⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。すなわち、軸継手を、GFRP、炭素鋼、接着剤、界面の4部分に分け、各部に適用する強度則を決定する。そして、ある

外力を軸継手に加えたときの軸継手内部の各点に生じる応力値を、それぞれの強度則に代入し、耐荷重値を超える部分があるときに、軸継手はその部分で破損し、そのときの外力値を軸継手の強度とする。強度則は、GFRP 部に対してホフマン則⁽⁷⁾、炭素鋼部と接着層に対してミーゼス則を用いた。また、界面に対しては、薄肉円筒の突合せ接着試験によって得られる接着強度則⁽⁴⁾⁽⁵⁾を用いた。これらの強度則を、GFRP に対し F_f 、炭素鋼に対し F_s 、接着剤に対し F_a 、界面に対し F_i とすると、次式のように書き表せる。

$$F_f = C_1(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + C_2(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + C_3(\sigma_z - \sigma_r)^2 + C_4\sigma_z + C_5\sigma_r + C_6\sigma_\theta + C_7\tau_{rz}^2 + C_8\tau_{z\theta}^2 + C_9\tau_{r\theta}^2 = 1 \quad \dots\dots(1)$$

$$F_s = \{\sigma_z^2 + \sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_r\sigma_\theta - \sigma_\theta\sigma_z - \sigma_z\sigma_r + 3(\tau_{r\theta}^2 + \tau_{z\theta}^2 + \tau_{rz}^2)\}^{1/2}/343 = 1 \quad \dots(2)$$

$$F_a = \{\sigma_z^2 + \sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_r\sigma_\theta - \sigma_\theta\sigma_z - \sigma_z\sigma_r + 3(\tau_{r\theta}^2 + \tau_{z\theta}^2 + \tau_{rz}^2)\}^{1/2}/64 = 1 \quad \dots\dots(3)$$

図8 軸継手における応力 $\tau_{z\theta}$ の分布

図10 軸継手におけるひずみ ε_θ の分布

図9 軸継手におけるひずみ ε_z の分布

図11 軸継手におけるひずみ $\gamma_{z\theta}$ の分布

$$F_i = |\sigma_r / 31.5|^{0.66} + |(\tau_{\theta}^2 + \tau_{rz}^2)^{1/2} / 30.8|^{0.66} = 1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(1)の定数 c_j ($j=1\sim 9$) は, 9個の基礎強度[3個の単軸引張強さ; $F_{tz}, F_{tr}, F_{t\theta}$, 3個の単軸圧縮強さ; $F_{cz}, F_{cr}, F_{c\theta}$, 3個のせん断強さ; $F_{s\theta\theta}, F_{s\theta z}, F_{sazr}$] から決定される材料定数で, 以下の式で書き表せる.

$$c_1 = \{(F_{tr}F_{cr})^{-1} + (F_{t\theta}F_{c\theta})^{-1} - (F_{tz}F_{cz})^{-1}\} / 2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

c_2, c_3 は, z, r, θ の循環により得られる.

$$c_4 = (F_{tz})^{-1} - (F_{cz})^{-1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

c_5, c_6 は, z, r, θ の循環により得られる.

$$c_7 = (F_{s\theta\theta})^{-2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

c_8, c_9 は, z, r, θ の循環により得られる.

F_{tz} などの基礎強度の値を表3に示す⁽³⁾.

4.2 強度予測結果 軸継手の強度予測は, 応力解析結果と式(1)~(4)に示す強度則とを組合せて, 軸継手の断面積比 $\bar{S}$ と, 接着長さ $\bar{L}$ を種々に変化させて行った.

軸継手に, 引張負荷またはねじり負荷を加えて, 各部が破損する負荷応力 $\sigma_{az}, \tau_{az\theta}$ を示したのが, 図12から図15である. 図12と図13の断面積比 $\bar{S}$ を変化させた場合, 引張り, ねじりの両負荷に対する強度は, 一般に, $\bar{S}$ の増加とともに強くなるが, GFRP については, $\bar{S}=0.5$ 近傍から急激に弱くなる. これは, GFRP 管の肉厚が, 極端に薄くなるためである. また,

断面積比 $\bar{S}$ の値の全域において, GFRP, 炭素鋼, 接着剤, 界面の4箇所の強度の差が小さく, 特にねじり負荷に対しては, $\bar{S}=0.5$ 近傍で, 4箇所の強度の差は, 10 MPa 程度にまで小さくなる. 図14と図15の接着長さ $\bar{L}$ を変化させた場合, $\bar{L}=1$ までは, 各部の強度が大きくなるが, $\bar{L}$ の値が1を超えると, 各部の強度はむしろ小さくなる傾向がある. 図16は, $\sigma_{az}-\tau_{az\theta}$ 応力平面における軸継手の強度を示す. この図では, 四つの断面積比 $\bar{S}$ の値について, GFRP, 炭素鋼, 接着剤, 界面のうち, 最も弱い部分の強度を示す. 図中に明記してないところは, 界面の強度である. この応力平面では, $\bar{S}=0.563$ のときが, 引張り, ねじりの両負荷に対して, 強度が最も大きくなる.

4.3 強度実験結果 断面積比 $\bar{S}$ と接着長さ $\bar{L}$ を変化させた場合の, 引張負荷に対する強度 σ_{az} と, ねじり負荷に対する強度 $\tau_{az\theta}$, および, それらの組合せ負荷に対する強度の実験結果を, 図12から図16のそれぞれに対応する図に示す. 実験値は, 初期破損応力と最終破断応力を示す. ここで, 初期破損応力は, GFRP と炭素鋼の境界近傍での応力-ひずみ曲線に, 異常が生じるときの応力とした. 最終破断応力のみを示したのは, 初期破損と最終破断が同時に起こったものである. 計算結果での, GFRP, 炭素鋼, 接着剤, 界面のうち, 最も弱い部分の応力が, 実験結果での, 初期破損応力に一致し, 破断した部分も, 計算結果とほ

図12 引張負荷に対する軸継手の強度(1)

図13 ねじり負荷に対する軸継手の強度(1)

は一致した。ただし、炭素鋼部での破断はなかった。図17に、ねじり負荷に対し、GFRP部で破断した状態を示す。また、図14における、 $\bar{L}=4$ の軸継手に引張負荷を加えた場合は、最終破断が起こる前に、治具取付

部が破断し、軸継手の最終破断応力は求められなかった。この場合の初期破断応力も、計算値より、かなり大きく、この形状では、計算結果と異なる傾向を示した。

5. 結 言

本研究では、GFRP 中空軸と炭素鋼軸との接着継手に、引張負荷、ねじり負荷、および、それらの組合せ負荷を加えた場合の、軸継手に生じる応力と、軸継手の強度を、解析と実験の両面から検討した。

まず、接着軸継手に、引張負荷、ねじり負荷、および、それらの組合せ負荷を加えたとき、軸継手に生じる応力分布とひずみ分布を、有限要素法により求めた。次に、応力解析結果と強度則とを組合せて、軸継手の形状と寸法が、軸継手の強度に与える影響を検討し、接着軸継手の最適形状を考察した。また、ひずみ分布の測定と、軸継手の破断実験を行い、応力解析結果と強度評価の妥当性を確認した。以下に、本研究で

表 3 GFRP の基礎強度

	F_{tz} $F_{t\theta}$	F_{tr}	F_{cz} $F_{c\theta}$	F_{cr}	F_{srz} $F_{sr\theta}$	$F_{sz\theta}$
Strength MPa	215	25.0	243	497	39.7	980

$F_{tz}, F_{t\theta}, F_{tr}$: Tensile strength
 $F_{cz}, F_{c\theta}, F_{cr}$: Compressive strength
 $F_{srz}, F_{sr\theta}, F_{sz\theta}$: Shear strength

図 14 引張負荷に対する軸継手の強度(2)

図 15 ねじり負荷に対する軸継手の強度(2)

図 16 $\sigma_{\theta z}$ - $\tau_{\theta z}$ 応力平面における軸継手の強度

図 17 試験片の GFRP 部における破断

得られた主な結果をまとめる。

(1) GFRP 中空軸と炭素鋼軸とともに、接着部の両端で、各応力成分の値が極めて高くなった。

(2) 有限要素法による軸継手の応力解析結果に、GFRP 部、炭素鋼部、接着剤部、接着界面、それぞれの強度則を適用し、軸継手の強度評価を行える。

(3) 上述の方法で得た軸継手の強度は、その初期破損強度に対応する。

(4) 接着軸継手を構成する、GFRP、炭素鋼、接着剤、界面の強度が、ほぼ等しくなる最適形状は、

GFRP と炭素鋼の断面積がほぼ等しく、接着長さが半径に等しい形状である。

文 献

- (1) Hipol, P. J., *J. Compos. Mater.*, 18 (1984), 298.
- (2) Granes, S. R. and Adams, D. F., *J. Compos. Mater.*, 15 (1981), 211.
- (3) 高田・池上, 機論, 49-443, C (昭 58), 1226.
- (4) 池上, 機論, 50-457, A (昭 59), 1557.
- (5) 杉林・池上, 機論, 51-462, C (昭 60), 314.
- (6) 杉林・池上, 機論, 51-461, A (昭 60), 302.
- (7) 林, 複合材料工学, (昭 46), 593, 日科技連.

討 論

〔質問〕 能 野 謙 介〔九州芸術工科大学〕

GFRP と金属との接着軸継手に対して解析および実験の両面から検討されていることに敬意を表す。次の二点についてお教え願いたい。

(1) GFRP と金属を接着した軸継手には GFRP と接着剤、炭素鋼と接着剤の 2箇所境界面があり、それぞれの界面に対して強度評価すべきであると考えられるが、この点についてどのように考えればよいか。

(2) 初期破損によりき裂が生じ、徐々に成長後、最終破断が生じると考えられる。このことから強度評価に破壊力学的方法が使用できないのか。

〔回答〕 (1) ご指摘のとおり、GFRP と炭素鋼を接着する場合、GFRP と接着剤、炭素鋼と接着剤の二つの界面が考えられる。しかしながら、GFRP に用いた樹脂と接着剤の弾性係数などの機械的性質がほぼ同じであるので、GFRP と接着剤との境界を界面と考えず、GFRP と接着剤の界面に対しては強度評価を行っていない。実験では、GFRP と接着剤の界面から破損した試験片はなく、炭素鋼と接着剤の界面および接着剤で破断している。

(2) 本研究では、継手の破損を巨視的に考えてお

り、破壊力学的な考え方をを用いた強度評価法に関する検討を行っていない。今後の課題と考える。

〔質問〕 鈴 木 靖 昭〔日本車輛製造(株)〕

GFRP と金属との接合において実用上有益な強度設計法に関するご研究に対し敬意を表す。次の点についてご教示いただきたい。

(1) 式(4)の界面強度則は鋼と接着層の界面に対するものと思われるが、GFRP と接着層の界面から破損した試験片はなかったのか。

(2) 初期破損から最終破損に至る経過をもう少し詳しくご説明いただきたい。

〔回答〕 (1) ご指摘のとおり、界面強度則は炭素鋼と接着剤の界面に対するものである。以下は、能野謙介氏への回答(1)を参照願いたい。

(2) 試験片に荷重を加えていくと、ある荷重で、GFRP と炭素鋼の境界近傍で測定した応力-ひずみ曲線に異常が見られる。これは、界面および接着剤の一部が破損(初期破損)したためだと考えられる。しかし、継手は破断せず、さらに荷重を増加させることにより、継手は破断する。