軽量 CFRP 製インテリジェント義足フレームの開発* (CFRP と金属ひざ関節接合部の設計研究)

斎藤 誠^{*1}, 中山 浩樹^{*2}, 萩原 修士^{*3}

Development of a Light Weight Prosthetic Frame Made of CFRP (A Joint Structure Comprising of a CFRP Frame and a Metal Knee Joint)

Makoto SAITO^{*4}, Hiroki NAKAYAMA and Shuuji HAGIWARA

^{*4} NABCO Ltd., Assist Products Dept.,
3-3, Takatsuka-dai, 7-chome, Nishi-ku, Kobe, Hyogo, 651-2271 Japan

Using FEM structural analysis, a load bearing frame for a light weight prosthesis made of carbon fiber reinforced plastic(CFRP) was developed, complying with both severe spatial restrictions and the ISO specification for strength. This paper focuses on the optimum design of the joint between the thin CFRP frame and a metal knee joint. A special bracket, which is implanted into the frame and prevents rotation of the knee, was developed for the joint, in order to reduce the stress concentration generated around the bracket hole of the frame. The orientation of the carbon fiber cloth ply was optimized taking the anisotropy of the CFRP into account. The static fracture strength of the CFRP frame predicted by the analyses agreed well with the results of fracture tests.

Key Words: CFRP Joint, Stress Concentration, Fiber Orientation, Prosthetic Component

1. 緒 言

インテリジェント義足はマイクロコンピュータによって下肢の動きを制御するもので広い歩行速度範囲でスムーズな歩行が得られるが⁽¹⁾, 制御系の重量のために義足全体が重くなるという問題があった。このため、負荷を支える構造部分、フレームの軽量化が大きな課題であったが、安全性の観点から1997年からISOにおいて大きな安全裕度をもった強度規格が制定され⁽²⁾, 高い強度を維持しながら軽量化を進める必要があった。

軽量化と高強度化を同時にねらう場合、比強度の高い炭素繊維強化樹脂(CFRP)が用いられる。CFRPはすでに広く使用されているが、課題の一つは金属部材との接合である⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。義足の場合、フレームの軽量化(薄肉化)には金属製ひざ関節との接合部が問題となる。従来のCFRP製義足では局所的に厚みを増すなどの強化策がとられているが、本義足の場合、制御系

の収納の点で空間的制約が大きいことに加え、FRP成形法上の理由からこのような対策は難しく、薄いCFRPに大きな負荷を伝達する接合構造が必要であった。

CFRP板の機械的接合で唯一系統的な研究が行われているのはボルト接合である。これは矩形CFRP平板の端部に円孔を有するモデルで負荷は軸力である。端末の寸法効果や繊維配向の影響については実用的な基準はほぼ確立しているといつてよい⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。しかしながら、解析的評価手法は十分には確立されておらず、もっぱら実験的に決定されている。これは異方性材料に対して応力集中を扱う場合、破壊モードを解析的に評価することが難しいことや⁽⁶⁾⁽⁷⁾ 積層順序によって強度が大きく変わるなど⁽⁸⁾, 板厚方向にも均質な材料として扱えないことも原因の一つと思われる。これに対し、義足の接合部には軸力のほかに大きな回転力が加わるため、接合部の形状(FRP側に開く穴形状)がボルト接合の場合の円孔とは異なり、形状自身が開発課題となるとともに、端末部が複雑な形状となる。これに繊維配向の影響が加わると実験的な手法での対応は困難であった。そこで本研究ではFEM解析により最適接合構造と繊維配向の検討を行ったものであるが、構造の工夫で高い応力集中や圧縮応力による座屈破壊を避け、かつ板厚方向には均質となるような

* 原稿受付 1998年7月16日。

^{*1} 正員, (株)神戸製鋼所機械研究所(〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5) [現: (株)ナブコアシスト製品部技術グループ]。

^{*2} 正員, (株)神戸製鋼所機械研究所。

^{*3} (株)神鋼電機(〒516-0005 伊勢市竹ヶ鼻町100)。

E-mail: Makoto_Saito@nabco.co.jp

Fig. 1 Concept for an intelligent prosthesis Left: Overall view and loading condition, Right: "Bracket" at the knee joint

繊維配向を採用することで解析評価精度を期待したものである。

2. 義足フレーム・接合部の基本構造

インテリジェント義足の基本構造は筒状の下肢(フレーム)と金属パイプ製の大たいがひざ関節に相当する回転軸で連結された構造である(図1)。制御系は下肢に収納される。立脚時には大たいと下肢は一体の剛な構造になる必要がある。通常は下肢がつねに回転軸に対して固定してあり、大たい側が体重やひざ曲げ角に応じて回転が止まる構造となっている。強度上の主たる課題は関節回転軸を下肢フレームに固定する方法である。回転を止める一般的なキー構造ではCFRPの薄い板の場合、局所的な高い圧縮応力で容易に破壊してしまう。通常はキー周辺の板厚を増して応力を下げるが、これは制御系との干渉ばかりでなく、フレームの成形性の点でも大きな問題となる。そこで、本研究では基本構造として図1右に示すように回転軸の両端部に突起を設け、この突起をフレームの面内に埋め込む方式を採用した(フレームに埋め込まれる金属部分をブラケットと呼ぶ)。これは回転軸とキーが一体となった構造であり、ブラケット周りの応力が問題となるが、ブラケットの突起の形は従来のキーに比べて大きな自由度があるため、大幅な応力低減の可能性はある。回転軸はフレームの上端に近い場所にあるため、突起はフレーム下方に設け、上方側については端末部にモーメントが直接作用しないように回転軸中心と同心の円盤とした。回転軸周りの端末部については関節の運動に支障のない範囲で最大の幅をとった。

3. 接合部の適正構造の検討

3・1 解析検討方法

3・1・1 負荷条件 負荷条件として ISO 10328 強

Table 1 Material properties of $[0/90]_6$ laminates

Test direction (degree)	Young's modulus (Gpa)	Poisson's ratio	Fracture strength (Mpa)
0, 90	49	0.05	620 ± 40
45	21	0.65	220 ± 20

Table 2 Elastic constants for analysis of anisotropic material

Young's modulus in X direction (Gpa)	Young's modulus in Y direction (Gpa)	Shear modulus (Gpa)	Poisson's ratio
49	49	6	0.05

Note

X and Y direction coincide with fiber orientation of $[0/90]_6$ laminates. Shear modulus was defined as $E_{45}/2(1+\nu_{45})$, where E_{45} and ν_{45} are Young's modulus and Poisson's ratio shown in Table 1.

Fig. 2 A finite element mesh for structural analysis Left: Overall, Right: Enlargement of joint area

度試験規格のうち、ひざ関節に最も厳しい負荷が作用する条件(Condition II)を採用した。これはつま先に全体重が作用している瞬間の状態で図1に示すような複雑な負荷条件になっており、体重による鉛直方向負荷に加え、関節回転軸の周りに大きなモーメントが生じる。最も重い体重区分では負荷 P は体重の3倍以上の4000 N、モーメントは220 N・mとなる。

3・1・2 素材 素材はエポキシ樹脂と炭素繊維平織クロス(6K)を用いた。本義足は優れた歩行性能から大量に適用されることが期待できるため、成形法については強度と量産性が同時に可能なRTM成形法を採用した。これは型の中にあらかじめクロスを入れておき、型閉後に樹脂を注入するもので、フレーム全体が一定の厚みの場合に量産効果が発揮できる。目標のフレーム重量から決まった板厚は3.5 mm、クロスは6枚、繊維体積率は約50%である。すべてのクロスは0, 90°方向を同一に積層した。これは成形材に積極的に強度異方性を与え、その最大強度を有効に利用するとともに、層間の異方性の差をなくすためである。表1には引張試験結果を示す。この種の積層材に見られるように負荷方向によって強度に3倍の差がある。

3・1・3 解析方法 図2に実際のフレーム構造に基づく解析メッシュとブラケット周りの拡大を示す。シェル平面要素で構成した。種々のブラケット形状について解析したが、いずれもブラケット周りは図2に示すような細かいメッシュにしてある。ブラケットに図1に示す負荷条件と等価な負荷を与えた。これによって軸力とモーメントがブラケットとの接触面を通じてフレームに作用する。フレームとブラケットの境界部には摩擦のない接触条件を導入した。これはCFRPの摩擦係数は0.1程度と小さいことに加え、摩擦を考慮すると最大応力の低下が予想され、摩擦係数のとり方によっては危険側の評価になるためである。解析は線形弾性解析とした。ブラケット形状の検討ではFRPは等方性材料とし、クロス配向の検討では直交異方性とした。この際の材料定数を表2に示す。ブラケットはFRPの2倍の厚みのアルミニウムとした。

3・2 解析結果

3・2・1 ブラケットの形状検討 図3のNo.1は従来のキーに近いブラケットについての解析結果で、ブラケット付近の最大主応力分布を示したものである。突起の周辺には引張応力で1500 MPa程度の極めて高い引張応力(S_1)と1000 MPa程度の圧縮応力(C_1)が発生する。一方、これに比べると低い回転軸周りの一部にも引張応力のピークが見られる。 (S_2) この値は400 MPa程度であり、材料強度の範囲に入っている。 S_1 や C_1 の値から考えて、このブラケット形状ではISO規格値よりかなり低い荷重で大規模座屈または“*Shear out*”に近いようなモードでブラケットが回転してしまうと推定される。 S_1 、 C_1 は突起の長さに依存すると考えられる。図3のNo.2は空間的な制約下で最大限に突起部分を長くした場合の結果である。 S_1 は700 MPa程度に、圧縮応力も300 MPa程度に大幅に低下する。しかしながら S_1 はまだ素材の強度よりも高い水準にある。一方、 S_2 は200 MPa程

度に大幅に低下する。 C_1 、 C_2 の分布は極めて局所的となる。

一方、突起先端の高い応力 S_1 は応力集中に起因するものと考えられる。そこで、突起先端の応力集中緩和を検討した。図4には2種類の改良案を示す。No.3は先端を一つの円弧としたもので、回転軸周りの円盤と外接線で結んである。No.4は回転軸周りの円盤と突起先端を大きな一つの円弧で結んだものである。No.3では S_1 は300 MPa程度に大幅に低下する。応力分布は極めて緩やかとなり、応力集中は顕著に改善されている。一方、 S_2 はやや上昇するが、その値は300 MPa程度である。2箇所の圧縮応力分布はNo.2より若干高い。この分布はブラケットとの接触部分に限定されている。No.4では圧縮応力のピーク C_2 が顕著に低下しかつ、応力こう配も緩くなっているが、突起先端部の S_1 では新たな応力集中が観察される。一方、 S_2 は230 MPaで、あまり大きな変化はない。以上の結果を図5にまとめた。No.3はすべてのピーク値がほぼ同じ水準にあり、応力の点では最もバランスがとれた形状といえる。

No.3の場合、 S_1 、 S_2 ともフレームとブラケットとの接触点から外れた位置に発生している。またその変形から S_1 、 S_2 はブラケット孔の一部の面内曲げに伴

Fig. 3 Results of structural analysis showing the maximum principal stress distribution around the bracket hole for bracket number 1 and 2

Fig. 4 Results of structural analysis showing the maximum principal stress distribution around the bracket hole for bracket number 3 and 4

Fig. 5 Comparison of the peak stress in different bracket designs. The position of stress is shown in Fig. 3 and 4

う引張応力で、特に接触に伴う応力集中はないと考えられる。一方、圧縮応力はブラケットとフレームの接触点に発生しており、弾性解析では高い応力が生じるが、実際には局所的な座屈が生じて接触面積が増大し、圧縮応力は顕著に低下すると考えられる。これは類似の局所的な圧縮応力状態になるボルト接合の場合でもクロス強化材では大規模な圧縮破壊が起きないことから容易に類推される⁽³⁾。したがって、No.3の場合、引張応力 S_1 , S_2 で設計できると考えられる。さらに S_1 , S_2 のピーク値は本素材の最大強度に対して余裕があることからこれを基本形状とした。

3・2・2 形状パラメータ適正化 No.3 ブラケットの形状最適化には二つの円弧部の半径と突起を伸ばす方向(図1の α)を決定する必要があるが、ここでは繊維配向にかかわる突起の傾き角 α について述べる。図6には α を変えて解析した結果から求めた最大主応力 S_1 , S_2 の大きさと方向を示す。大きさでは S_1 は 0° 付近を除いてほぼ一定であり、 S_2 も 30° 以上ではほぼ一定値をとる。一方、主応力の方向については S_1 は α が 45° 付近を最小値として凹形に大きく変化する。 S_2 は変化量は少ないが α が 70° 付近を最小値とする凹形の変化を示す。素材の異方性を利用するには S_1 , S_2 の方向が互いに平行か垂直に近いほうがよいと考えられる。この観点ではブラケットの傾き角は 60° 前後を中心とした $45\sim70^\circ$ の範囲と考えられる。

3・2・3 最適繊維配向の検討

(1) クロス配向角による応力分布の変化 図7はブラケット No.3 に対してクロスの配向角 θ を変えた場合の最大主応力の分布である。ブラケットの角度 α は 70° とした。矢印は S_1 , S_2 のピークをベクトル表示したものである。 S_1 のピーク位置はクロスの配向変化に追従するように若干移動するが、応力方向はあまり変化しない。一方、 S_2 はピーク位置の移動

は小さいが方向は θ につれて大きく変化する。この結果、 S_1 , S_2 ともに 45° 付近では最大主応力は円弧面に対して大きく傾くことになる。図8には S_1 , S_2 の値とその方向(フレームの長手方向からの傾き角)の変化を示す。 θ に対して S_1 と S_2 は逆の位相で増減を繰り返す複雑な変化を示す。 θ が 0° 付近では S_2 が、 45° 付近では S_1 が大きくなる。この変化は主応力方向の変化と対応しており、繊維配向によって応力成分が大きく異なることを示している。

(2) 破壊強度の評価 各繊維配向に対してフレームの破壊強度の評価を行った。破壊強度の評価対象は二つの引張ピーク応力領域 S_1 および S_2 である。組合せ応力下でのFRPの破壊条件についてはいくつかの評価式が提案されている。一般的には Tsai-Wu の破壊則がよく合うとされているが、同破壊則はFRPの圧縮強度が引張強度より低いことを考慮しており、引張応力 S_1 , S_2 のように主要な応力が引張りの場合は誤差が大きくなると予想される。そこで、圧縮

Fig.7 Change in the maximum principal stress distribution around the bracket hole with the cloth orientation θ

Fig.6 Change in the tensile peak stress and stress direction with the inclination (α) of the bracket No.3

Fig.8 Change in the peak tensile stress and its direction around the bracket hole with fiber cloth orientation

Fig. 9 Distribution of “Q” value around the bracket hole with fiber cloth orientation θ

強度を特に考慮しない Tsai-Hill の破壊条件の評価式

$$Q = (S_x/F_x)^2 + (S_y/F_y)^2 + (S_{xy}/F_{xy})^2 = 1$$

を用いた。これは、Tsai-Wu の破壊則で圧縮強度を引張強度と同じとしたことと等価である。 S_x, S_y, S_{xy} はクロス方向の 0, 90° 方向の応力およびせん断力であり、 F_x, F_y, F_{xy} は同方向の引張強度およびせん断強度であり、表 1 の結果から $F_x, F_y = \sigma_{0,90}, F_{xy} = 1/2\sigma_{45}$ とした。弾性変形を仮定すれば Q は荷重の平方根に比例するため、 Q が破壊荷重の指標になり、 S_1, S_2 近傍で最大の Q 値を示す点で破壊が生じることになる。 S_x, S_y, S_{xy} は図 7 の有限要素法解析で求まっているので、全要素の Q を求めることができる。図 9 は Q の分布を示す。ただし、有効な Q 値は S_1, S_2 の近傍に限られる。主応力のピークと対応した 4 箇所に Q 値のピークが見られるが、2 箇所は圧縮応力のピークに対応するものである。 S_1, S_2 に対応する Q については分布の形もおおむね最大主応力のそれに近いが、クロス傾き角が増えると Q の最大値が大きくなり、分布も広がる。

図 10 には各クロス傾き角 θ における Q の最大値を取り出してプロットした。 S_1 に対応する Q の極大値 Q_{S1} は θ に対してあまり変化しないが、 S_2 に対応する Q の極大値 Q_{S2} は θ が 0° で最小値をとり、この前後で鋭く増大する。 0° 付近を除くとつねに Q_{S2} が高く、破壊強度は Q_{S2} で決まることがわかる。

Q_{S2} に基づいて破壊荷重の推定を行った。荷重の増大に伴って接触点の位置や接触面積が変化するため、接触点近傍では応力と荷重の関係には非線形が予想されるが、 Q_{S2} の発生点は接触点から遠く離れており、かつブラケットの幾何学的特徴から接触点の変化は接触点と Q_{S2} 発生点の距離に比べると小さいと考えられることから、 Q_{S2} に生じる非線形性は小さいとすると破壊荷重 P_c は Q_{S2} の平方根の逆数として求められ

Fig. 10 Change in the “Q” value and fracture load with fiber cloth orientation θ . Dotted line indicates fracture load obtained from the Tsai-Wu criterion. $\times$ indicates experimental results

る。この結果を図 10 に合せて示す。これは Q_{S2} 値の逆の傾向を示し、 $\theta = 0^\circ$ 付近で最大値 5 000 N、 60° 付近で最小値 3 600 N となり、クロス配向角 θ によって破壊荷重に約 40% の違いが見られる。最も高い破壊荷重を示した $\theta = 0^\circ$ では破壊荷重 P_c は ISO 規格に対して 25% 程度の余裕があるという結果になる。ただし、 $\theta = 0^\circ$ 付近では当然ながら P_c も θ に敏感であり、クロス配向角はフレームの長手方向に対して $0 \pm 10^\circ$ 程度に制御する必要があることを示している。

なお、比較のため、Tsai-Wu 則による破壊強度を図 10 に破線で示す。圧縮破壊強度は引張強度の 2/3 とし、 S_1, S_2 近傍の各節点の応力成分に基づき、Tsai-Wu 則を満たす荷重(荷重に関する二次式の正根)を求め、その最小値を破壊荷重とした。 S_1, S_2 の破壊荷重とも Tsai-Hill 則で求めた破壊荷重より全体的に 15% から 20% 程度高くなっている。しかしながら、破壊が S_2 で発生すること、最適クロス配向角が 0° という結論には違いはない。

4. 解析結果の検証

図 11 には成形後のフレームおよび組立後のインテリジェント義足を示す。図 12 にはクロス配向角の異なるフレームについて破壊試験を行った後のブラケット孔付近の状況を示す。いずれのクロス配向の場合も破壊は S_2 で発生している。破壊の方向はクロス配向角 θ が 0° の場合は円弧面に垂直で、 0° 方向の繊維が破断しているが、 $\theta = 15^\circ$ 以上では繊維に沿ったせん断形破壊であった。最大圧縮応力点 C_1, C_2 では局所的な座屈が観察されたのみであった。

破壊試験で得られた破壊荷重を解析値 $P_c(S_2)$ と比較した。結果を図 10 に示す。クロス配向角 θ に対する傾向はよく一致している。 θ が大きくなると解析値

Fig. 11 Appearance of the frame and fully fabricated intelligent prosthesis attached to a patient

Fig. 12 Appearance of the frame after the static fracture test. Arrows indicate cracks

との差は大きくなる傾向にあるが、その差は10%程度であり、特に $\theta=0^\circ$ では差は5%程度になる。

なお、Tsai-Wu 則で求めた破壊荷重と実験値の差は $\theta=0^\circ$ でも約15%と大きくなっている。これは破壊点の応力が引張応力主体であるのに対し、Tsai-Wu 則で圧縮破壊強度を考慮した結果と思われる。

上記結果に基づいて量産されたクロス配向角 0° のスレーム 23 体について破壊試験を行った結果、破壊は全数 S_2 で発生しており、破壊荷重の平均値は 4 900 N、標準偏差は 430 N であった。このばらつきは強度がクロス配向角に敏感であることを考慮すると小さいと思われる。これはクロスの $0, 90^\circ$ 方向がフレームの

主軸方向に一致しているため、成形時にクロス配向の調整が容易なためと考えられるが、これはブラケットの突起の傾き角を 70° とした結果である。

すでに 2 000 体が実際に使用され、3 年が経過しているが、フレームに関する問題は発生していない。

以上のように、引張応力で破壊するような接合構造(孔形状)を採用すれば異方性の強い FRP と特殊な端形状に対しても FEM 解析によって現実的な精度で破壊強度が評価できることがわかった。

5. 結 言

CFRP 製の義足フレームの軽量化を目的に、薄い FRP 板と金属製ひざ関節の接合構造を検討した。FRP 板の面内に関節軸と連結した金属製ブラケットを挿入し、それによって回転力をフレームに伝達する方式において、

(1) 有限要素法構造解析により、フレームに発生する応力を著しく低減でき、かつ破壊に対して引張応力が支配的となるブラケット形状を決定した。

(2) 上記ブラケット構造に対し、異方性を考慮した解析により、クロスの最適繊維配向を決定した。これは Tsai-Hill の組合せ応力下の破壊評価式に基づく無次元強度とその分布から決定した。

(3) 破壊試験の結果、破壊モードや破壊荷重は上記の解析から予測される結果とよく一致した。

(4) この結果、所定の軽量化と同時に ISO 強度規格を満足する義足フレームが開発できた。

文 献

- (1) 中谷一雄, NABCO 技報, No. 82 (1997), 20-27.
- (2) ISO/DIS 10328, *Prosthetics-Structural Testing of Lower Limb*, (1997).
- (3) 例えば, 植村益次(林編), 継ぎ手, 複合材料工学, (1971), 838-870.
- (4) Godwin, E. W. and Matthews, F. L., *Compos.*, 11-7 (1973), 155-160.
- (5) Quinn, W. J. and Matthews, F. L., *J. Compos. Mater.*, 11-2 (1977), 139-145.
- (6) Chang, Fu-Kuo and Scott, R., *J. Compos. Mater.*, 18 (1984), 255-278.
- (7) Hyer, M. W. and Lui, D., *Exp. Mech.*, 24-1 (1984), 48-53.
- (8) Crews, J. H., Jr. and Hong, C. S., *NASA TP*, 1862 (1981).