原著論文

スキーポール用 CFRP シャフトの強度に及ぼす衝撃損傷の影響†

北 沢 俊 二* 風 間 武* 島 田 享 久*
篠 原 昭** 小 林 光 征***

Effect of Impact Damage on Strength of CFRP Shaft for Ski-Pole

Shunji KITAZAWA*, Takeshi KAZAMA*, Takahisa SHIMADA*
Akira SHINOHARA** and Mitsuyuki KOBAYASHI***

Abstract

Evaluation of strength decreases of ski pole shafts made of carbon fiber reinforced plastics (CFRP shaft) caused by surface impact damage during skiing were investigated in both bending and post-buckling tests. Aluminum-alloy ski pole shafts (Al-alloy shaft) were also tested for comparison. Compared to non-damaged CFRP shafts, 50% decrease in bending fracture load and 80% decrease in post-buckling displacement were found after giving an impact load of about 1 joule to the surface of the shaft. This was assumed to be the amount given by actual collisions with ski plates during skiing. Observation by X-ray showed that the strength decrease was mainly caused by inner damage such as delamination of composite layers. On the other hand, the strength decrease of Al-alloy shaft was smaller. As with post-buckling, the compressive fracture occurred at the impact-damaged surface region in CFRP shafts, while in Al-alloy shafts conventional buckling fractures were observed. On the basis of results obtained, it was finally proposed that the tests employed in this study were suitable for estimating strength of CFRP shafts of ski poles.

Key words : Ski-Pole, CFRP Shaft, Impact Damage, Bending Strength, Post-Buckling

†原稿受付 1998年 3 月 3 日

1997年10月 スポーツ工学シンポジウム1997にて発表

*長野県工業試験場

〒380-0922 長野県長野市若里188

**信州大学繊維学部

〒386-0018 長野県上田市常田 3-15-1

***信州大学工学部

〒380-0922 長野県長野市若里500

*Industrial Research Institute of Nagano, 188, Wakasato, Nagano, Nagano, Japan (380-0922)

**Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University, 3-15-1, Tokita, Ueda, Nagano, Japan (386-0018)

***Faculty of Engineering, Shinshu University, 500, Wakasato, Nagano, Japan (380-0922)

1. 緒 言

近年, 炭素繊維複合材料 (CFRP) 製のパイプは, 航空・宇宙機器やスポーツ用品など様々な構造材料として使用されている。スポーツ用品では, ゴルフシャフトや釣り竿に適用され, 高い比強度・比弾性の特色を生かした材料として主流を占めてきたが, 最近になってスキー用品の一つであるスキーポール (スキーストック) のシャフト材料に, アルミニウム合金の代替材料として使用されつつある。しかし, スキーポールの使用環境は他のスポーツ用品とは異なり, シャフトとスキーエッジの衝突など材料に直接的な外力を受ける過酷な状況にあるため, 材料設計の概念にこのような衝撃荷重を考慮する必要がある。衝撃荷重を受けた CFRP は, 衝撃部の繊維の破断や層間剝離といった衝撃損傷が発生し, 著しい材料強度の低下が起こることは, 繊維強化積層板について多くの報告がなされている¹⁾。しかし, 直径10数 mm 程度の小径パイプでの衝撃損傷の特徴や残存強度についての報告はあまり見られない。また, スキーポールに関する規格 ISO7331-1983²⁾においても, 相当の評価項目がなく, スキーポールの開発指針となりうる試験法が望まれている。

本論文では, スキーポール用 CFRP シャフトが使用中に受ける衝撃損傷の特徴と強度低下の関係を明らかにするとともに, 従来のスキーポール用アルミニウム合金シャフトの試験結果の比較から, CFRP シャフトの特徴について報告する。さらに, スキーポール使用時に見られるポストバックリングの破壊現象から, スキーポールの基本的な試験法を提案する。

2. 実 験 方 法

2. 1 供試シャフト

本実験で使用した CFRP 製シャフトの形状, 寸法を Fig. 1 に示す。スキーポール用シャフトは, ストレート部とテーパ部からなっている。シャフトの肉厚は, 1.5mm 一定で, マトリックスにエポキシ樹脂を使用したプリプレグをシートワインディング法によって成形している。Table 1 に CFRP シャフトの材料構成を示す。CFRP シャフトとの比較実験に使用したアルミニウム合金製シャフトは, 高力系7001材 ($\phi 18$, $t 0.8$) である。

2. 2 衝撃損傷の付与方法

スキーポールのシャフトは, スキー滑走時にスキーエッジが衝突し, その衝撃によって損傷を受けることが予想される。この現象を実験室

(a) Dimension

(b) Cross section

Fig.1 Geometry of CFRP shaft

Table 1 Material composed of CFRP shaft

Layer	Sheet	Thread	Ply Number	Resin
a	T700WD	T700	1	TORAY #2500
b	T300Cross	T300-3000	2	Original
c	T700WD	T700	3	TORAY #2500
d	T300Cross	T300-3000	3	Original

において定量的に与える方法を Fig. 2 に示す。衝撃の定量化は、デュポン式塗膜用落下衝撃試験機を用い、荷重点を 90° (先端半径 $R=0.1\text{mm}$) にすることにより、シャフトの長手方向と直角に損傷を与える。落下高さは最大で 0.5m とし、自由落下させる。落錘は 1kg を主に用い、位置エネルギーから求める衝撃エネルギーを高さを変えることにより変化させ、最大 5ジュール(J) とする。ただし、 1J 以下の場合については、落錘を 0.3kg と 0.5kg とする。

Fig.2 Schematic illustration of impact damage test

2. 3 衝撃損傷の評価方法

Fig. 2 の方法により衝撃を付加した CFRP シャフトの損傷の特徴は、外観評価と内部欠陥観察により行う。

外観評価は、CFRP シャフトの衝撃箇所表面の形状を触針式の形状測定機で測定する。内部損傷は、造影剤 (1.4-ジヨードブタン) を損傷部表面から減圧含浸させた後、軟 X 線透過装置によって印画紙に露光し観察する。

2. 4 強度低下の評価法

衝撃付加による CFRP シャフトの強度低下は、インストロン型材料試験機 (東洋ボールドウィン製 UTM-10T) を用い、Fig. 3 の曲げ試験方法により評価する。曲げ試験では、負荷方法により破壊現象に影響することが考えられることから、Fig. 3 (a) に示すように損傷部分を荷重点半径 50mm の三点曲げ試験法と、Fig. 3 (b) のように荷重点が損傷部分に接触しない四点曲げ試験を行う。ここで、三点曲げ試験と破壊荷重の比較を行う場合、最大曲げモーメントが等しくなるように荷重値の換算を行う。実験にはシャフト直管部を使用し、支点間中央の圧縮側に損傷部分が位置するように試料をセットする。

滑走中でのシャフトの軸線上に負荷が掛かる場合を想定し、Fig. 4 に示すようなポストバック

Fig.3 Methods of bending tests

Fig.4 Method of post buckling test

リングによる破壊試験²⁾³⁾を行う。ポストバックリング試験の両端の支持は、石突き側を軸線上とし、グリップ側を治具により軸線から10mm偏心させ、荷重と変位の関係を求める。ポストバックリング試験のシャフトの挙動は、高速ビデオにて観察する。

3. 実験結果および考察

3. 1 衝撃損傷の特徴

1Jの衝撃エネルギーを加えたときの損傷の表面形状の測定結果を Fig. 5 に示す。同図から、CFRP シャフトはアルミニウム合金シャフトに比べ、円周方向で荷重点による破壊の進展が大きく、アルミニウム合金シャフトに見られる荷重点周辺の緩やかな変形が見られない。また、損傷近傍に折損によるバリが発生している。

2種類のシャフトに付けられた損傷の特徴は、衝撃エネルギーと損傷の最大深さから把握できると思われることから、その関係を Fig. 6 に示す。同図から、アルミニウム合金シャフトは衝撃エネルギーの増加とともにその損傷深さも増加している。この関係はシャフトの塑性変形も含むことから、衝撃エネルギーの増加に対し、

Fig.5 Appearances of damaged surface measured with surface form tester

損傷深さがより大きくなっている。

これに対して、CFRP シャフトの場合には、衝撃エネルギーが約3J まで損傷深さが増加するのに対し、それを越えると損傷深さが一定となっている。この理由として、衝撃エネルギーが約3J までは、表面構成材料の破壊の進行によ

て損傷が深くなるが、それを越えると材料内部の層間剥離によって衝撃エネルギーが吸収されると推定される。

この破壊現象の把握は、CFRP シャフトへ1Jから5Jまでの衝撃エネルギーを与えたときのX線透過写真により比較する。その観察結果を Fig. 7 に示す。同図から、衝撃エネルギーが増加すると、材料内部の破壊周辺部から層間剥離が進展していくのが観察できる。

3. 2 シャフトをスキーポールとして使用したときの衝撃エネルギーの推定

実際にシャフトをスキーポールとして使用したときのスキー板による衝撃エネルギーを推定するため、使用状態を実験室内で再現し、Fig. 6 のアルミニウム合金シャフトの傷の最大深さととの関係から衝撃エネルギーを求める。このときの損傷の発生要因としては、一つは「滑走中にシャフトとスキー板が衝突する」、もう一つは「シャフトでスキー板の雪をはらう」ような場合を想定する。

以上の条件から求めた、衝撃エネルギー量の発生頻度を Fig. 8 に示す。同図から、実際に発生する衝撃エネルギーは、ほとんど0.05 J ~ 0.3 J の範囲に集中しており、スキー板との衝突の場合は、頻度は低いが衝撃エネルギーが1.5 J 程度に達することもある。

Fig.6 Relationship between maximum depth of surface damage and impact energy

3. 3 曲げ試験における衝撃損傷の影響

次に、シャフトの曲げ強度について、衝撃エネルギーと破壊荷重の試験結果から議論する。衝撃損傷を付与した後のアルミニウム合金シャフトと CFRP シャフトの三点曲げ試験と四点曲げ試験の破壊荷重の結果を Fig. 9 に示す。両試験結果から、破壊はすべて損傷を与えた圧縮側で起こっている。

四点曲げ試験結果から、衝撃損傷のない場合の破壊荷重は、CFRP シャフトがアルミニウム合金シャフトに比べ高く、衝撃エネルギーの負

Fig.7 Photograph of damaged surfaces observed by X-ray

Fig.8 Distributions of impact energy generated by ski pole and plate

荷とともに急激に低下し、50%以下となっている。衝撃エネルギーが1J 以上になると、破壊荷重は漸減し、アルミニウム合金の場合と同じような傾向を示している。このことは、CFRP シャフトの破壊現象がアルミニウム合金のそれとは異なり、僅かな内部損傷が存在していても残存強度に大きく影響することを示している。

一方、三点曲げ試験の結果から、両シャフトの破壊荷重は、四点曲げ試験結果に比べて低くなっている。これは、中央の荷重点に応力が集中することから、その部分での座屈破壊が発生することによることを示している。特にその傾向は、CFRP シャフトの衝撃エネルギーが負荷されない場合に顕著である。

以上のことから、シャフトの曲げ試験は四点曲げ試験が適しているが、スキーポールのようなテーバが付いた場合は四点曲げ試験が困難なことから、衝撃エネルギーが1J 以上負荷された場合には、三点曲げ試験が有効であるといえる。このことから、以後の曲げ試験結果の議論は三点曲げ試験にて行う。

次に、CFRP シャフトでは微小な内部損傷がシャフトの破壊荷重に大きな影響を及ぼしていることが Fig. 9 から明らかであることから、CFRP シャフトに静的な損傷を与えて曲げ試験

Fig.9 Relationship between fracture load and impact energy in bending tests

Fig.10 Relationship between bending fracture strength and maximum depth of notch formed by file

を行う。静的損傷の負荷は、ヤスリの角でシャフトの円周方向に削ることによって行い、そのときのシャフトの損傷状態をX線透写真により観察すると、静的な損傷では層間剥離の内部損傷は見られなかった。この静的損傷を与えたシャフトの三点曲げ試験を行う。付加した静的損傷の最大深さと破壊荷重の関係を Fig.10に示す。同図から、傷の深さが0.3mm程度までは破壊荷重が低下しない。付加した損傷の深さと Fig. 5の衝撃損傷深さを対応させると、衝撃エネルギーは約2Jとなる。これらの結果から、CFRP シャフトの著しい残存強度の低下は、材料の外傷の深さでなく、内部損傷の進展が起因している。

3. 4 ポストバックリング試験における衝撃損傷の影響

スキーポール使用時に軸線上に過度の荷重がかかり、ポストバックリングの状態になると、アルミニウム合金の場合、シャフトの中央部から屈曲する。しかし、CFRPの場合、塑性変形を起こさないため、典型的分離破断する場合が多い。ここでは、CFRPの衝撃損傷による変形量の減少と破壊の特徴について議論する。

衝撃損傷のないCFRPシャフトの軸線方向に

Fig.11 Relationship between bending strain for buckling displacement of 40 and 90 mm and position from tip of undamaged CFRP shaft

Fig.12 Relationship between buckling fracture displacement and position from tip of CFRP shaft damaged with 0.9J in impact energy

貼付したひずみゲージの出力から、ポストバックリング時のシャフトの各部のひずみ量を Fig. 11に示す。同図から、最大ひずみの個所は石突きからの軸線位置が300~400mmの範囲で、テーパー部にある。次に、0.9Jの衝撃エネルギーを1個所付加したCFRPシャフトを用い、損傷部分

を圧縮側に配置してポストバックリング試験を行う。損傷を与えた軸線位置と破壊に至るまでの変位量の測定結果を Fig.12 に示す。同図から、軸線位置300~800mmの範囲に損傷を与えた場合、いずれもバックリングの変位量が40~50mmと小さく、シャフトの変形が小さな場合においても、

損傷部からの破壊を起こしている。ここで、衝撃損傷部を圧縮側へ配置した場合は、全て損傷部から破壊を起こしている。これに対し、衝撃損傷がないシャフトの場合は、変位量が平均 240 mm程度で破壊し、破壊箇所は最大ひずみ点の個所付近にみられた。このように、シャフトの破

Fig.13 Fracture phenomena of 2 shafts observed by high-speed camera

損は損傷の有無に依存していることを示している。

次に、衝撃損傷部を引っ張り側へ配置すると、損傷部からの破壊はみられず、破壊に至るまでの変位量は低下しない。しかし、シャフトの破壊状況は、3分割以上の分離破壊を起こすこともある。

これらの破壊の観察は、高速ビデオ装置によって行う。0.9 Jの衝撃エネルギーをシャフトのテーパ側先端から400mmの位置へ付加し、損傷個所がポストバックリングによって破壊する現象の結果をFig.13に示す。アルミニウム合金シャフトの場合は屈服破壊がみられるが、CFRPシャフトでは、衝撃損傷個所での圧縮破壊がみられ、破壊形態が明らかに異なっている。CFRPシャフトの破面は破断した繊維が鋭く、スキーポールとしては危険性が高いといえる。

4. 結 言

本論文では、最近使用量が多くなってきているスキーポール用CFRPシャフトについて、スキー滑走中に生じる衝撃損傷によって起こる強度低下を従来のアルミニウム合金シャフトと比較することによってその原因と破壊の特徴を明らかにし、強度低下を評価できる試験方法を提案した。

CFRPシャフトは、スキー板との衝突によって与えられると思われる1J程度の衝撃エネルギーによって破壊荷重が50%以上の減少がみられ、ポストバックリングでの破壊までの変位量が約

80%減少する。CFRPシャフトの強度低下は、アルミニウム合金シャフトと異なり、層間剝離の内部損傷が主要因であることがX線透過写真や静的損傷付加実験から明らかである。ポストバックリングでのCFRPシャフトの破壊は、アルミニウム合金シャフトの屈服破壊と異なり、衝撃損傷個所での圧縮破壊であることを示している。

スキーポール用シャフトの評価に本試験方法を用いることにより、スキーポールへのCFRPシャフトの導入に際し安全性の向上が促進されるが、最も重要な課題は、ポストバックリングにおける分離破壊防止対策法を開発することであるといえる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、実験に協力して頂いた信州大学繊維学部（現、新光電気工業（株））北島正邦氏、また試料の提供を頂いた（株）シナノ様はじめ長野県スキー工学研究会の会員各社に深謝します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、荻原慎二、他；CFRP積層板の落錘衝撃による微視的損傷と残留圧縮強度、日本機械学会論文集(A), Vol.63, pp.145-150, 1997.
- 2) ISO7331-1983(E) ; Ski-poles for alpine skiing - Safety requirements and test methods, 1983.
- 3) Varadan, T.K. and Prathap, G., ; Inelastic Post-Buckling of Tapered Flexible Bars, Computers & Structures, Vol.21, pp.681-686, 1985.