角打組物の圧縮特性に関する研究 -側面拘束無し条件での復元挙動について-

日本ピラー工業 上田隆久・大谷章夫
京都工芸繊維大学大学院 阿久津公彦・仲井朝美・濱田泰以

Compression Properties of Square Braided Fabric -Recovery properties after flat compression-

Takahisa Ueda^{*1}, Akio Ohtani^{*1}, Kimihiko Akutsu^{*2}, Asami Nakai^{*2} and Hiroyuki Hamada^{*2}

^{*1} Nippon Piller Packing Co.,Ltd, 11-48 Nonakaminami 2-chome, Yodogawa-ku, Osaka 532-0022, Japan

^{*2} Advanced Fibro-Science, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606-8585, Japan

Abstract: In this study, recovery properties of square braided fabric after flat compression were focused. The observation of the cross section with optical microscopy was performed and the mechanism of recovery deformation was clarified. Inside structure of braided fabric and recovery properties were extremely changed at first compression and then tended to converge to stable structure. Recovery ratio kept almost constant value after 2nd cycle. Recovery of braided fabric was resulted from change in braiding angle of fiber bundle 'a' and 'b' and decrease in crimp of fiber bundle.

(Received 16 December, 2002; Accepted 26 August, 2003)

1. 緒言

各種機器からの内部流体の漏れを止める部品であるグランドパッキンには多数本の繊維束を角型断面に組んだ角打組物を使用されている。このグランドパッキンは圧縮された状態で使用され、その取り付け方法には2平面間での圧縮である側面を拘束しない条件と、溝内で圧縮する側面拘束条件の2種類がある。

この時に要求される性能は、加圧時に均一に変形すること、および密着状態を形成できることである。そして、加圧力の変化が発生した場合においても、変形して密着状態を維持する必要がある。すなわち、圧縮力に対応する変形応答性である圧縮特性と除圧に対する変形応答性である復元特性の解明は、漏れを止める性能を改良するために重要である。このため、前報 [1] においては、側面を拘束しない条件で繰り返し圧縮負荷試験を行い、圧縮時の荷重と変位の関係について検討した。さらに未圧縮時と圧縮時組物の断面観察を行い、角打組物の繊維束配向状態の変化と組物圧縮挙動の関係について報告した。

そこで本研究では、前報に引き続き側面拘束無し条件で角打組物の繰り返し圧縮負荷試験を行い、特に復元時の荷重と変位の関係について検討した。さらに未圧縮時、圧縮時および復元時の組物の断面観察を行い、角打組物の復元

挙動と繊維束配向状態の変化の関係を明らかにした。前報と異なる点は、色の異なる繊維束を用いることにより、より正確な繊維束配向状態を容易にかつ正確に得ることができる手法を採用した点である。

2. 実験

2.1 供試体の作製

本研究で採用した角打組物は、前報と同様である。図1(a)にその外観写真を示す。組物中の繊維束配向状態は本研究においては非常に重要であるため、組機における繊維束の軌道について本報においても述べることにする。図1(b)は、組機を上方より観察した軌道を示しており、4箇所軌道は対角線上を移動する経路aと、対角線に平行な長方形軌道である経路bの2種類の経路より構成されている。

用いた材料はフィラメントの直径12 μ m、集束本数5000フィラメントのアラミド繊維(HM-1055-7250d ; AKZ0)を2本引き揃えた繊維束である。なお、本報においては断面観察を容易にするために、経路aおよび経路bに配置する繊維束のうちの各2本には、異なる色に着色した繊維束を使用した。この繊維束は、その断面形状を円形と仮定した場合に、直径が約1.3mmである。この材料を使用して、組物

表面に露出している経路bの繊維束と組物長手方向との角度が 35° 、平均断面寸法が 10.9mm の角型断面を有する紐状の角打組物を作製した。ここで、平均断面寸法は、組物の幅と厚みより断面積を計算した値の平方根である。

(a)

(b)

Fig. 1 (a) Picture of square braided fabric, (b) Path of fiber bundle a and b.

2.2 圧縮、復元試験

側面拘束なし条件下での繰り返し圧縮・復元試験は、直径 150mm の円盤状上に長さ 150mm の角打組物を保持し、直径 100mm の円盤状圧子を用いて繰り返し行った。試験条件は前報と同様であり、インストロン万能試験機 (Type4206) を用いて、1mm/min の変位制御にて、最大荷重 2000N までの圧縮と荷重 0 状態までの除圧を、36 回繰り返し行い、荷重および変位を計測した。なお、ここでは最大荷重の 1.0% (20N) の状態を荷重 0 状態と設定した。

2.3 断面観察

未圧縮時、圧縮時および復元時の組物の断面観察を行い、繊維束の図心を算出し、図心の軌跡より繊維束配向状態を調べた。前節で述べたように異なる色の繊維束を用いているため、繊維束の識別が容易かつ正確となった。断面観察手順のフローチャートを図 2 に示す。以下、フローチャート中の番号に従い説明する。

- ①未圧縮の組物と、最大荷重負荷時に相当する変位量で圧縮した組物および最大荷重負荷後に荷重 0 状態に相当する変位量に復元した組物を、不飽和ポリエステル樹脂を用いて包埋する。
- ②包埋した組物を、長手方向に対して直角な面で 1mm 毎に切断研磨する。
- ③各断面をデジタルスキャナを用いて、デジタル画像としてパーソナルコンピュータに取り込む。取り込んだ画像の一例を図中に示す。
- ④取り込んだ画像を、画像処理ソフト PhotoShop (Adobe 社製) を用いて、色付き繊維束部分のみを抽出し、対象とする繊維束断面領域を白で、その他を黒で色分けする。色分け後の画像の一例を図中に示す。
- ⑤図心座標解析ソフトを用いて、色付き繊維束断面の図心座標を得る。
- ⑥図心座標およびサンプリング間隔 (1mm) より、繊維束の図心座標値が決定される。得られた図心座標を直線で補完することにより繊維束配向状態を可視化することが可能となる。

Fig. 2 Flowchart for 3 dimensional construction of fiber orientation.

3. 実験結果

3.1 圧縮・復元特性

図3に、側面拘束なし圧縮試験における代表的な圧縮・復元曲線を示す。圧縮曲線は初回の圧縮において、変位の増加に対して荷重が緩やかに増加する領域(領域1)と、変位の増加に対して荷重が急激に増加する領域(領域2)より構成され、初回と2回目以降の圧縮曲線は大きく異なる。これに対して復元曲線は、少量の変位に対して荷重が急激に低下する領域のみから構成される。2回目以降の復元曲線は、同一の復元曲線に収斂する傾向を有する。

図4に復元率と圧縮回数の関係を示す。図中に示すように圧縮曲線における荷重0から最大圧縮時までの変位量を圧縮量 l_c とし、復元曲線における最大荷重から荷重0までの変位量を復元量 l_r とする。復元率は l_r を l_c で除した値であると定義する。復元率は、初回圧縮時には約30%であるが、2回目の圧縮では85%となり、以後100%付近でほぼ一定となる。したがって、角打組物は側面拘束なし条件下において、一度圧縮される事で、復元率は増加して一定となる。この挙動は、グランドパッキンを側面拘束なし条件で使用する際、初回圧縮時には復元量が小さくかつ、永久ひずみを発生する事で相手面の凹凸に対して密着状態を形成し易くすると共に、初回圧縮後に加圧面間距離が変化した際に、グランドパッキンは復元することで引き続き密着状態を維持できる事を示している。

3.2 繊維束配向状態

3.2.1 断面写真観察

図5に未圧縮時、圧縮時および復元時組物の断面観察より得られた、断面写真を示す。図中の上下方向は、圧縮負荷方向である。まず、圧縮時において、経路bの繊維束(以下繊維束bとする)が表面を形成している厚さ方向の中央部分と経路aの繊維束(以下繊維束aとする)が表面を形成する角部の変形は異なることを示している。未圧縮時の角打組物の中央部分は幅方向に少量突出した形状で完全な正方形ではない。この組物を圧縮すると、厚さ方向に寸法が減少する。この時の変形は前報で報告した挙動と同様

Fig. 3 Load-displacement curve for flat compression test.

Fig. 4 Relationship between recovery ratio and flat compression cycle.

であり、中央部分の繊維束bは幅方向に変形して、より大きく広がる。これに対して、繊維束aが表面を形成する角部においては幅方向への寸法変化は小さい。復元時には、加圧方向である厚さ寸法が増加する挙動を示す。ただし、この初回の復元では前述した永久ひずみを発生するため、未圧縮状態の厚みまでには復元しない。一方、幅方向の寸法変化はほとんど発生していないことを示している。

Fig. 5 Deformation of cross section for square braided

3.2.2 3次元座標における図心軌跡

繊維束配向状態を定量的に表すために、繊維束aの未圧縮時、圧縮時および復元時の繊維束断面より算出した繊維束断面の図心を3次元座標上にプロットし、長手方向に結んだ軌跡を図6に示す。同様に図7は繊維束bの繊維束断面図心の軌跡を示している。この3次元グラフのXY平面上における太線は、組物断面形状を長方形化して示しており、圧縮前、圧縮後および復元後ではこの断面がX方向、Y方向に変形していることがわかる。

3.2.3 2次元平面における図心軌跡

次に、繊維束配向状態の変化をより良く解釈するために、各3次元グラフにおける繊維束断面の図心軌跡をXZ、YZ、XYの各平面に投影した軌跡について検討する。この二次元平面への投影処理は、前報では行わなかったものである。本項では定性的事項について述べ、定量的なことは次項にて述べる。図8(a)に、未圧縮時における繊維束aの断面の図心軌跡をXZ、YZ、XYの各平面に投影した軌跡を示す。繊維束aにおいては、XY平面図に示すように、対向する角部を結ぶ2直線より構成され、XZ、YZ平面投影図においてはジグザグに配向していることが明らかである。また、繊維束は組物内部から組物表面へ現われる点で折り返している。このため角部で折り返している繊維束aは、折り返し点がXZ、YZ平面投影図において、同じZ座標に現われる。図8(b)に、未圧縮時における繊維束bの断面の図心軌跡をXZ、YZ、XYの各平面に投影した軌跡を示す。XY平面

投影図における図心軌跡は、比較的短い2辺および長い2辺から構成され、組物内部から組物表面に現われる4箇所で折り返している。XZ、YZ平面投影図では、ジグザグに配向し、折り返し点がこの両平面投影図において異なるZ座標に現われる。

図9(a)に、圧縮時組物の繊維束aの断面の図心軌跡をXZ、YZ、XYの各平面に投影した軌跡を示す。Y方向に圧縮変形しているため、全体にY軸方向のみ小さくなっている。未圧縮時と圧縮時の図心軌跡を比較すると、YZ平面投影図における直線部分の角度変化を発生している。XY平面投影図では直線部分の角度変化に加えて、この直線部分のクリンプが大きくなっている。図9(b)に圧縮時組物の繊維束bの断面の図心軌跡をXZ、YZ、XYの各平面に投影した軌跡を示す。繊維束bはYZ平面投影図とXZ平面投影図においては角度変化のみを発生している。

図10(a)に、復元時の組物の繊維束aの断面図心の軌跡をXY、YZ、XZの各平面に投影した軌跡を示す。組物はY方向に復元しているが、繊維束aの図心軌跡の直線部分の角度 α の変化は小さく、クリンプが変化して小さくなる。図10(b)に、復元時組物の繊維束bの断面の図心軌跡をXY、YZ、XZの各平面に投影した軌跡を示す。繊維束bは、組物の幅方向であるX方向に変化しないが、厚み方向であるY軸方向に繊維束直線部分の角度が変化してY軸方向の寸法が大きくなる。

Fig. 6 The 3D path of the centroid for fiber bundle a.

Fig. 7 The 3D path of the centroid for fiber bundle b.

Fig. 8 The path of the centroid for fiber bundle before compression.

Fig. 9 The path of the centroid for fiber bundle after flat compression .

Fig. 10 The path of the centroid for fiber bundle after recovery.

3.2.4 3次元座標におけるクリンプ係数

前項では定性的なことについて述べたが、本項では定量的なことについて検討する。各図心の3次元座標より、各経路ごとの繊維束配向状態を定量的に把握するために、繊維束のうねり度合いを示すクリンプ係数、および、繊維束配向角度を算出した。なお、このクリンプ係数および繊維束配向角度は、繊維束がジグザグに配向している折り返し部、すなわち、表面形成領域を除き、組物内部の繊維束断面の図心データを利用して算出した。クリンプ係数とは、

所定区間の繊維束断面の図心において、複数の隣りあう図心間距離の総和を、起点の断面図心と終点の断面図心間の直線距離で除した値である。表1に、クリンプ係数の算出結果を示す。繊維束aのクリンプ係数は圧縮前1.037であったのが圧縮時に1.048に増加するが、復元時には1.036に減少して未圧縮時と同等のクリンプ係数になる。繊維束bに関しては、未圧縮時は1.029、圧縮時1.029、そして復元時1.024とほとんど変化しない。

Table 1 Change in crimp ratio

	Before compression	After compression	Recovery
a	1.037	1.048	1.036
b	1.029	1.029	1.024

Table 2 Change in projected braiding angle.

		Before compression	After compression	Recovery
θ_{yz}	a	31.5 (6.3)	15.0 (2.4)	18.4 (0.5)
	b	25.2	12.6	17.9
θ_{xy}	a	41.4 (6.9)	18.7 (1.8)	22.2 (0.5)
	b	34.5	16.9	21.7

Fig. 11 Model of deformation for fiber bundle path (projected X-Y plane).

3.2.5 繊維束配向角度

組物内部における繊維束配向角度の変化について検討した。繊維束配向角度の算出方法は前報[1]と同じである。表2に各投影面における繊維束の配向角度を示す。 θ_{yz} は未圧縮時に繊維束aは 31.5° 、繊維束bが 25.2° とその差が 6.3° であるのに対して、圧縮時には各々 15.0° と 12.6° に減少して、その差は 2.4° と減少する。一方、復元時には各々 18.4° と 17.9° と増加して、その差は 0.5° とさらに小さくなる。 θ_{xy} に関しては、未圧縮時に繊維束aと繊維束bに存在していた角度差 6.9° が、圧縮時には 1.8° に変化して、復元時には 0.5° とさらに等しくなる。側面拘束無しの条件下で圧縮および復元を繰り返すことで、両繊維束は配向角度が等しい繊維束配向状態へと移行したと考えられる。

4. 考 察

以上の結果より、明らかとなった側面拘束無し条件下での圧縮と復元における繊維束配向状態の変形モデルを図11に示す。(a)は未圧縮時の繊維束aと繊維束bのXY平面への投影図である。

繊維束aは組物角部の変曲点2箇所において表層部に現われるほかは、組物内部の対角線上に存在している。これに対して繊維束bは組物表面の変曲点4箇所において、表層部に現われる。この繊維束に圧縮力が作用した時、繊維束aは組物厚みが小さくなることで、加圧面との角度 α が小さくなるとともにクリンプが増加する。これに対して繊維束bは、加圧面との傾斜角 β が小さくなるとともに、組物表面に現われている部分の繊維束接触幅 W も変化する。に厚み寸法のみが増加する復元挙動を示す。この変形に伴い、圧縮前の供試体においては配向角度が異なっていた繊維束aと繊維束bの傾斜角 α と傾斜角 β の差が小さくなる。

加圧面に接している $W1$ は大きくなるが、側面の表層部は接触による拘束がなく自由に変形して、幅方向に突出するため $W2$ は小さくなる。そして復元時には、繊維束aと繊維束bの角度変化を発生するとともに、繊維束aのクリンプ係数が未圧縮時の状態になることで、幅寸法は変化せずに厚み寸法のみが増加する復元挙動を示す。この変形に伴い、圧縮前の供試体においては配向角度が異なっていた繊維束aと繊維束bの傾斜角 α と傾斜角 β の差が小さくなる。

5. 結 論

- 1) 角打組物に繰り返し圧縮負荷を与えた場合の復元率は、初回圧縮と2回目以降の圧縮では著しく異なる変形挙動を示す。初回圧縮時には、永久ひずみを発生する復元挙動を示すのに対して、2回目以降の圧縮では、一度圧縮される事で復元率は、増加して100%に近い値に収斂して安定する。
- 2) 未圧縮時に異なっていた繊維束aと繊維束bの配向角度は、圧縮・復元の過程を経過する事で、同一角度に変化してより安定な繊維束配向状態に移行する。
- 3) 角打組物の復元は、繊維束aと繊維束bにおいて発生した圧縮による配向角度の変化と繊維束aにおいて発生するクリンプの変化が元に戻ろうとすることで発生する。

文 献

1. T. Ueda, A. Ohtani, A. Nakai, H. Hamada, Y. Fujii, *Sen'i Gakkai*, **59**, 273 (2003).
2. T. Ueda, M. Sakaguchi, H. Hamada, *Sen'i Gakkai Preprints*, G-100 (1999).