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圧縮挙動—

日本ピラー工業㈱ 上田隆久^{*1}
京都工芸繊維大学大学院 大谷章夫、仲井朝美、濱田泰以^{*2}
セイコー化工機㈱ 藤井善通^{*3}

Compression Properties for Square Braided Fabric without Constraint to the Side Face

Takahisa Ueda, Akio Ohtani, Asami Nakai, Hiroyuki Hamada and Yoshimichi Fujii

^{*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

^{*3} Seikow Chemical Engineering & Machinery Ltd., 3-1-16, Shioe, Amagasaki, Hyogo 661-0976, Japan

Abstract: Abstract: Cyclic compression test was performed on square braided fabric and the hysteresis loop in load and displacement was investigated. The observation of the cross section with optical microscopy was performed and the mechanism of deformation under compressive loading was clarified. Inside structure of braided fabric and compressive properties were extremely changed at first compression and then tended to converge to stable structure; compression ratio, reconstruction ratio and elastic modulus kept almost constant value after 2nd cycle. The change in structure of braided fabric was resulted from increase in crimp ratio of fiber bundle 'a' and change in braiding angle.

(Received 2 December, 2002; Accepted 25 December, 2002)

1. 緒 言

加熱炉扉部分からの熱風の噴き出し漏れ防止や、ポンプやバルブ等流体機械回転部分からの内部流体の漏れを止める部品として、グランドパッキンが使用されている。このグランドパッキンに要求される性能は、均一に曲がることと良好な接触状態を形成できることである。この用途に用いられるグランドパッキンには、多数本の繊維束を丸型断面に組んだ丸打組物と角型断面に組んだ角打組物が使用されている。丸打組物は断面の中心部分を構成する中心糸と呼ばれる繊維束と、この中心糸の周囲を被覆する形で組まれている繊維束で構成されている。この中心糸は組物長手方向に引き揃えて配置されるのが通常であり、曲げ加工時には中央部の組まれていない部分と表層部の組まれた部分では異なる変形挙動を示し、均一な変形状態を示さない。またグランドパッキンの使用形態である平面間で圧縮された場合の接触形態も、接触幅が小さい線接触となる欠点がある。これに対して、角打組物は総ての繊維束が組まれている事で、曲げ加工にて所定の形状に変形させる事が容易である。加えて、加圧時の接触形態も面接触であり、接触幅を大きく設定できる利点がある。したがって、角打組物が上述の用途において多く採用されている。

図1は、グランドパッキンの外観を示しており、所定の断面寸法を有する長尺の紐状体として、供給されている。例えば、加熱炉での使用では、所定長さに切断した後、図2に示すように、額縁状にした後、扉と炉本体の間で加圧して、相手面に密着させる事で漏れを止めている。図3は、グランドパッキン取り付け方法の種類を示している。この図において、aは側面を拘束しない条件で用いられる場合、bは側面を拘束した溝内での圧縮を示している。これらの使用方法において、取り付け時の圧縮、すなわち初回の圧縮で組物を容易に変形させ、相手面との良好な接触状態を形成する事が重要である。次に、使用時に加熱炉内の温度や圧力の変化により、グランドパッキンに作用する加圧力の変化が発生した場合においては、変化した圧力に対応して一定の変形応答を示し、初回圧縮で形成した密着状態を長期間にわたって維持できる事が理想である。このため、グランドパッキン加圧時、除圧時の変形特性、すなわち、圧縮・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。しかしながら角打組物の変形挙動に関する検討は殆どなされていないのが現状である。ここで組物だけではなく繊維物も含むテキスタイル加工品の圧縮に関してみると、Ukponmwanらは繊維物の圧縮特性について[1]、沖らは各種繊維織物に対するKES試験機を使用

した圧縮の線形性、エネルギーおよびレジリエンスについて[2-4]、松平らは圧縮時の接触状態について[5]、有馬らは編物の圧縮特性について[6]報告している。しかし、これらの研究は、厚肉構造を有しない平織の、かつ、微小な荷重条件下での変形に関するものである。また Jonasan らは織物を使用した複合材の圧縮特性について[7-10]、玉木らは、3次元組物複合材の圧縮特性について[11-16]報告している。これらは積層する事で厚肉構造を構成しているが、いずれも樹脂を含浸した複合材に関して、変形量の少ない条件下での特性について論じている。一方、複合材用途以外で加藤らは、テープ状の平打組物の圧縮特性等について[17-19]報告している。ここでは、断面厚みの小さい組物の衣料用途での微小な荷重条件下における変形挙動について検討しており、グランドパッキンのような、大変形領域および工業製品が使用される加圧条件での変形に関する検討はなされていない。

そこで本研究では、厚肉構造を有する角打組物の、工業用品として使用される加圧条件下での圧縮特性を明らかにする事を目的として、側面拘束無しの条件で、繰り返し圧縮負荷試験を行い、荷重と変位の関係について検討した。

Fig.1 Schematic drawing of square braided fabric.

Fig.2 Example for usage of gland packing as electric oven.

Fig.3 Compression method.

さらに未圧縮時と圧縮時の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により、組物の圧縮挙動の関係を明らかにした。

2. 実験

2.1 供試体の作製

本研究で採用した角打組物は、図4に示す組機を用いて作製した。組機プレート①には交差部分を有する4個所の軌道②が設けてある。この軌道上のスピンデル③は、繊維束ボンを保持して、各軌道の交差部を交互に通過して移動しつつ周回する。なお、この図では、各軌道の各々に1個のスピンデルを図示しているが、実際の組機では、対角線上を移動する2箇所の軌道に各々8個、他の2箇所の軌道には各々10個で合計36個のスピンデルを配置している[20]。この周回するスピンデルに保持された繊維束ボンより、連続的に繊維束④を引き出すとともに、組まれた組物を上方に引き取ることで、角打組物を作製した。この時、組角度の異なる角打組物の作製は、スピンデルの周回速度と組まれた組物の引き取り速度の関係を変更する事で可能となる。

図5(a)は、組機を上方より観察した軌道を示しており、4つの軌道は対角線上を移動する経路aと、対角線に平行な角形軌道である経路bの2種類の経路より構成されている事を示している。この経路模式図における矢印は、各経路に配置されたスピンデルの移動方向を示している。そして、スピンデルは各経路の交差点を交互に通過する。図5(b)は組物を構成している繊維束の経路aと経路bのモデルを示している。この繊維束の経路図における細い実線は組物の外形、太い実線は組物内部での理想的な繊維束経路を示している。経路aの繊維束は、対向する角部を結ぶ2直線より構成され、ジグザグに配向している。これに対して経路bの繊維束は、隣り合う組物表面を經由し、4直線より構成される螺旋形状に配向している。この両経路のスピンデル数は、前述したとおり8個および10個と各軌道上で異なるために、スピンデルが経路上を一周する時の組物長手方向移動距離は異なる。このため2経路の繊維束は組物内部での組角度が異なる。

用いた材料はフィラメントの直径 $12\mu\text{m}$ 、集束本数5000フィラメントのアラミド繊維(HM-1055-7250d ; AKZO)を2本引き揃えた繊維束である。なお、この繊維束は、その断面形状を円形とした場合に、直径が約 1.3mm である。組角度 θ は、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とし、角度 22° 、 27° 、 35° の3水準にて、角型断面を有する紐状の角打組物を作製した。表1は、今回作製した角打組物の仕様を示している。ここで、平均断面寸法は、組物の幅 b_1 と厚み b_2 より断面積を計算した値の平方根である。空隙率は、アラミド繊維の比重を1.44と仮定して、組物の体積と質量の関係より計算した。組角度が変化しても平均断面寸法と空隙率はほとんど変化しなかった。

Fig.4 Schematic drawing of braiding machine.

Fig.5 Path of fiber bundle a and b.

Table 1 Specification of specimen.

Braiding angle θ (°)	22.0	27.0	35.0
Average side length b (mm)	10.5	10.7	10.9
Porosity (%)	54.2	54.9	53.5

2.2 圧縮・復元試験

圧縮・復元試験は、インストロン万能試験機(Type4206)を用いて行った。長さ 100mm に切断した供試体を、直径 100mm の円盤上に側面拘束無しの状態に置き、直径 100mm の円盤状の圧子を用いた。試験は、圧縮速度 1mm/分の変位制御にて、最大荷重 2000N までの圧縮と最大荷重の 0.25%と設定した荷重 0 時までの除圧を、5 回繰り返して、この時の荷重、組物の厚みおよび幅寸法を計測した。

2.3 断面観察

組角度 35° の供試体を用いて、未圧縮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に、エポキシ樹脂

を含浸し、硬化処理を行った。樹脂含浸した組物を長手方向に対して垂直な面で 1mm 毎に切断研磨して、断面写真を撮影した。断面写真より得られる繊維束の断面形状と位置から、画像処理を用いて、各繊維束断面の図心位置を計算した。次に、これら図心位置を利用して、未圧縮時と圧縮時における組物内部での繊維束配向状態を算出し、圧縮による繊維束配向状態の変化について検討した。

3. 実験結果

3.1 圧縮・復元特性

図 6 に代表的な圧縮・復元曲線を示す。初回圧縮では、圧縮曲線は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)より構成される。ここで、領域 1 と領域 2 の境界は、初期の曲線に対する接線と最大荷重付近の曲線に対する接線の交点とする。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。初回圧縮時には、この圧縮曲線と復元曲線が異なっており、荷重 0 時には、初期寸法の約 25%に相当する永久ひずみを発生する。一方、2 回目以降の圧縮では、初回圧縮時と異なり領域 2 のみが存在し、また圧縮曲線と復元曲線の差も初回圧縮と比べて小さい。圧縮回数の増加による最大荷重時および荷重 0 時の変形量の変化は少なくわずかであり、同一の圧縮・復元曲線に収斂する傾向を有する。この挙動はグランドパッキンとして使用する際、初回圧縮時には、荷重変化に対する変位量が大い事で相手面とよい接触状態にし易くすると共に、初回圧縮後は相手面形状に密着した状態を維持する優れた特性であることを示している。

Fig.6 Load-displacement curve of cyclic loading test.

Fig.7 Relationship between compression ratio and compression cycle.

図7は圧縮率と圧縮回数の関係、図8は復元率と圧縮回数の関係を示している。ここで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 a 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 b とする。圧縮率は、 a を圧縮前の供試体厚みで除した値であり、復元率は b を a で除した値であると定義する。したがって、圧縮率は圧縮ひずみに相当し、復元率は復元回復ひずみに相当する。図7より、初回圧縮時においては圧縮率が25%であるのに対して、2回目以降の圧縮では10%でほぼ一定となる。一方で、図8に示すように、初回圧縮時においては復元率が50%であるのに対して、2回目以降の圧縮では90%でほぼ一定となる。したがって、角打組物は、一度圧縮される事で、圧縮率は減少、復元率は増加して安定する。この傾向は、3種類の組角度の供試体とも同じであり、作製時の組角度の影響は少ない。これは、初回圧縮時に大きな変形を発生した事で、いずれの組角度の供試体も、組構造が変化し、安定な繊維束配向状態に固定されて変化しなくなったと考えられる。

図9は、最大荷重負荷時近傍の圧縮曲線の傾きを用いて計算した接線弾性率と圧縮回数の関係を示している。弾性率も圧縮率・復元率と同様に、初回圧縮時に大きく変化した後、2回目以降の圧縮では、ほとんど変化しない事を示している。一度、圧縮する事で高い弾性率に設定できる事は、グラندパッキンとして用いた場合、使用時に、より高い応力分担特性を有することを示している。また復元率が増加して安定する事で、加圧面間隔の変化に起因する圧縮力の低下に対しても、復元することで良い接触状態を維持できる事を示している。

3.2 断面繊維束配向状態

図10は圧縮前と圧縮後の断面観察より得られた、繊維束の輪郭を示している。図中の圧縮方向は上下方向であり、同じ経路に配置されている繊維束は、同一の色を用いて表示する事で識別した。白が a 黒が b を示している。圧縮により、組物は加圧方向に寸法が減少して、加圧方向に対して90度方向(幅方向)には寸法が大きくなる。ただし、多数本の繊維束を異なる経路で組んだ角打組物の幅方向への変形量は均一ではなく、角部と中央部で変形量に差があることを示している。経路 b の繊維束が表面を形成している中央部分は、幅方向により大きく変形している。これに対して、経路 a の繊維束が表面を形成する角部の幅方向への変形量は少ない。この中央部と角部の変形量の差を Δt とし、図10中に図示する。これら経路の異なる繊維束の変形状態の違いについて、組物内部の繊維束配向状態を詳細に観察する事により、以下に考察する。なお、この変形において、組物の外形形状および各繊維束の断面形状は変化し、巨視的には密度変化が生じるが、繊維束断面積の総和は、未圧縮時と圧縮時で変化の無い事が確認されており、側面拘束無し条件での角打組物の変形は、繊維束内の密度変化を伴わない変形とみなせる。

Fig.8 Relationship between reconstruction ratio and compression cycle.

Fig.9 Relationship between apparent modulus and compression cycle.

Fig.10 Deformation of cross section of square braided fabric and fiber bundle.

Fig.11 3D path of centroid for fiber bundle a before and after flat compression.

Fig.12 3D path of centroid for fiber bundle b before and after flat compression.

図 11 は、繊維束配向状態を定量的に表すために繊維束 a の未圧縮時と圧縮時の繊維束断面より算出した断面図心を長手方向に結んだ軌跡である。同様に図 12 は繊維束 b の断面図心の軌跡を示している。これらによって、図 5 に示した繊維束の配向状態とは異なり、表面形成部にも少量の直線状に配向している領域があることが確認された。

各図心の 3 次元座標より繊維束のうねり度合(クリンプ係数)および繊維束配向角度を算出し、これらの値を用いて組物内部の繊維束配向状態を検討する。なお、このクリンプ係数および繊維束配向角度は、ジグザグ配向している折り返し部、すなわち、表面形成部を除き、組物内部の断面図心データを利用して計算した。図 13 はクリンプ係数 K の定義を図示している。クリンプ係数 K は所定区間の断面図心 ($G_0 \sim G_n$) において、複数の隣りあう図心間の距離 $l_1 \sim l_n$ の総和を、起点の断面図心 G_0 と終点の断面図心 G_n 間の直線距離 L で除した値である。表 2 に、クリンプ係数の算出結果を示す。繊維束 b のクリンプ係数は、未圧縮時と圧縮時にほとんど変化していないのに対して、繊維束 a は圧縮されたことでクリンプ係数が増加している。

次に、組物内部における繊維束の配向角度変化について検討した。図 14 は、繊維束配向角度の評価方法を模式的に示したものである。この図において、供試体の長手方向は Z 軸方向、加圧方向は Y 軸方向である。3 次元的な繊維束配向を 2 次元平面に投影し、各面における投影された繊維束と組物長手方向との間の角度を繊維束配向角度とした。加圧面である XZ 平面への繊維束の投影図と Z 軸が形成する角度を θ_{xz} 、YZ 平面への繊維束の投影図と Z 軸が形成する角度を θ_{yz} とし、したがって、2 種類の繊維束配向角度が得られる。表 3 に各面における繊維束配向角度の算出結果を示す。 θ_{xz} は未圧縮時に繊維束 a は 32.2° 、繊維束 b が 39.3° とその差が 7.1° であるのに対して圧縮時には各々 48.8° と 51.6° に増加して、その差は 2.6° と減少する。 θ_{yz} 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 11.2° が加圧する事で角度差は 0.8° とほぼ同じ角度に変化した。

$$K = \frac{\text{Length of fiber bundle}}{\text{Distance between first and last point of liner part}} = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_{n-1} + l_n}{L_0}$$

Fig.13 Definition of crimp ratio K.

Table2 Change in crimp ratio before and after flat compression

	crimp ratio K	
	Before compression	After compression
a	1.14	1.23
b	1.11	1.14

Fig.14 Braiding angle of fiber bundle.

Table3 Change in projected braiding angle before and after flat compression.

		Before compression	After compression
θ_{xz}	a	32.2	48.8
	b	39.3	51.6
θ_{yz}	a	34.8	27.5
	b	46.0	28.3
θ_{xy}	a	42.6	24.1
	b	37.2	26.1

Fig.15 Model of deformation for fiber bundle path (projected X-Y plane).

4. 考 察

前章までの結果をまとめると、1) 繊維束 b のクリンプ係数は、未圧縮時と圧縮時に殆ど変化していないのに対して、繊維束 a は圧縮されたことでクリンプ係数が増加していた。2) 未圧縮時には経路によって異なっていた 2 平面への投影図における角度が、圧縮時にはいずれも経路によらず等しい角度になった事より、圧縮によってほぼ等しい繊維束配向角度に変化していた。まず前者について考察するために図 15 に、以上の結果より得られた圧縮による繊維束配向状態の変化メカニズムを示す。(a) は未圧縮時の繊維束 a と繊維束 b の X-Y 平面への投影図モデルであり、(b) は圧縮時の繊維束 a と繊維束 b の X-Y 平面への投影図である。繊維束 a は、組物角部の変曲点において表層部に現れる他は、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、組物表面の変曲点において、 w_1 又は w_2 の幅で表層部に現れる。この両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事で、加圧面との角度 α は小さくなる。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、組物表面に現れている部分の繊維束の接触幅 w も変化する。加圧面に接している w_1 は大きくなるが、側面の表層部は接触による拘束が無く自由に変形し、幅方向に突出するため、 w_2 は小さくなる。この表面形成部分における変形挙動の違いが、図 10 の断面観察において述べた繊維束 b で形成される側面中央部分の幅寸法が $\angle t$ 大きくなる理由と考えられる。また、この変形挙動により組物の対角線近傍に直線に近い形で配置されている繊維束 a は、圧縮時に隣接する繊維束の変形に伴って加圧される事で曲がり(クリンプ)を生じるのに対して、繊維束 b は、横方向に広がる引張り力が作用しているために、クリンプ係数の変化は無かったと考えられる。

次に、後者に関しては、角打組物の繊維束は経路により異なる角度で組まれていたものが圧縮により 3.1 で述べた安定な繊維束配向へと変化すると考えられる。ここで、安定な繊維束配向とは、圧縮時に繊維束長手方向に発生する引張り力が均等化することであるとされる。さらに、内部隙間が減少することによりこの安定な繊維束配向が固定される。今後、より詳細に復元後の断面を観察することにより、圧縮復元線図との関連を検討していく。

5. 結 論

- 1) 角打組物に繰り返し圧縮を荷した場合、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。
- 2) 初回圧縮時には容易に変形が可能であるのに対して、一度圧縮した後、一定の圧縮率、復元率、および弾性率に収斂して安定する。
- 3) 初回の圧縮を受けることで異なる特性を示す現象は組物内部における繊維束 a においてクリンプを発生するこ

と繊維束の配向角度が均一となって均質化することに起因する。

これらの特性はグラウンドパッキン用途に使用する際に有用な特性である。

文 献

1. J.O.Ukponmwan: Textile Research Journal, Vol.64 No.12, (1994), 756 - 760
2. T.Oki, T.Akaba, H.Suwa: Sen'i Kakou, Vol.147 No.11 (1995), 505 - 510
3. M.Matsudaira, H.Qin, Y.Kimura: Journal of the Textile Institute, Part1 No.1, (1998), 117-125
4. M.Matsudaira, H.Qin: Sen'i Kikai Gakkaishi, Vol.46, T226 (1993)
5. M.Matsudaira, H.Qin: Sen'i Kikai Gakkaishi, Vol.48 No.8 (1995), 45 - 49
6. D.Arima, T.Matuo, M.Nakajima, M.Takahashi, E.Y.Yamada: Journal of Textile Engineering, Vol.46, No.1(2000)
7. C.Poon, S.Lee, R.Golud, R.Scott: International SAMPE Exhibition Vol.34 No.2 (1989) 2498-2505
8. R.F.Scott, S.Lee, C.Poon, P.C.Gaudert: Polymer Engineering Science, Vol.31 No.18 (1991) 1310-1315
9. Y.Kobayashi, Y.Tanaka: Symposium of Kikai Gakkai No. 95 - 14 (1995) 49-52
10. L.Dickinson, M.H.Mohammed, E.Klang: European Conference on Composite Material (4th), (1990)
11. Y.Tamaki, M.Matsumoto, M.Kimbara, K.Hukuda: Nihon Fukugo Zairyo Gakkaishi, Vol.22 No.4 (1996), 136 - 147
12. F.K.Ko: Composite Materials 7th Conference (1986), 392-403
13. A.B.Macandar, R.M.Crane, E.T.Camponeschi: Composite Materials Testing and Design 7th Conference(1986),422-443
14. A.Abusafieh, S.R.Kalidindi: Proc. Am. Soc. Compos. (1994) 1118-1125
15. M.Furuyama, K.Mitani, K.Hukuda, M.Matsumoto: Nihon Fukugo Zairyo Gakkaishi, Vol.22, No.2 (1996)
16. L.W.Gause, J.M.Alper: Journal of Composites Technology & Research (1987) 141-150
17. H.Kato, T.Mori, M.Iwasa: Sen'i Kakou, Vol.44 No.9 (1992), 420 - 424
18. T.Mori, C.Ito, M.Iwasa: Nihon Kasei gakkaishi, Vol.44 No.8, (1993) 655-663
19. C.L.Ma, J.M.Yang, T.W.Chou: Composite Materials Testing and Design, 7th Conference (1986), 404-421
20. T. Ueda, M.Sakaguchi, H.Hamada: Sen'i Gakkai Preprints (1999), G-100