筒状角組系組物の設計方法と機械化手法

京都工芸繊維大学・院・工芸科学研究科・先端ファイブ科学専攻 多田牧子・仲井朝美・濱田泰以

Design and Method of Rotary Braiding for Coupled Square Braids with Hollow Cross Sections

Makiko Tada, Asami Nakai and Hiroyuki Hamada

Advanced Fibro-Science, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606-8585, Japan

Abstract : Aiming at a more mechanically optimized braided preform and its manufacturing, thick square braids with hollows were investigated and the method for determining bundle paths of the 3D braids were developed. Formulas giving the optimum number of bundles of the square braids were derived and a design method to arrange horn gears and to determine the number of horn docks, necessary for the construction of the 3D rotary braider, were also presented. These lead to the manufacture of 3D braids with arbitrary braiding structures. On the basis of the proposed theory, a rotary braider capable of manufacturing any 3D braids with a wide variety of cross sections was designed by unitizing the spindle-exchange mechanism. The realized braider worked successfully and manufactured thick 3D braids with solid and hollow cross sections.

(Received 5 July, 2002 ; Accepted 20 November , 2002)

1. 緒 言

軽量かつ高強度の構造体・部品は合理的に繊維補強された複合材料によって実現されるが、その補強形態として3次元テキスタイルが有望である。中でも組物は組系(繊維束)が軸方向に連続的に配向し、軸方向の荷重に対して全ての繊維が荷重を負担できること、厚肉のものや、不定形断面のものなど三次元形状が製作可能なこと、中空・中実ともができること、製作工程の自動化ができること、などの合理性を有している。しかしながら、複合材料に用いられている組物の種類は、力学的合理性とは無関係に、組機で製作可能なものに限られているのが実状である。現在、機械製作されている組物は1目飛び、2目飛び、3目飛びなどの薄肉の平組と円筒状組物などである。中実角組の機械化については、G. W. Duや F. K. Koが3次元組機について、特に2-Step方式や直交(Cartesian)方式組機として研究している[1]。また、B. Obolenskiは、新しい3次元組機として羽車(ホーンギア)方式組機の紹介をしている[2]。さらに、L, C, T, I 型など任意の断面をもつ組物(以下、任意断面角組系組物と呼ぶ)の研究として、濱田、仲井らによる2次元組機を発展させ構成したI型断面組物[3]、2-Step方式で製作する方法として、J.W.S.HearleやG.W.DuによるT型断面組物[4]、直交方式組機での3次元組物の研究としてT.D. Kostar, T.W. ChouによるI型断面組物[5]、M. Schneider, B. Wulfhorstなどによる羽車方式のLZ断面組物のコンピュータシミュレーション[6] などがある。しかし、3次元組物の普遍的な設計理論は提示されておらず、合理的な機

械化手法が確立されたとは言い難い。

筆者らは前報で、まず日本古来の角八つ組とそれから派生した角組系組物の製組方法と組系数・経路図決定・機械化の方法を研究し、羽車方式組機による任意の角組系中実組物の機械化手法を明らかにした[7]。本報ではそれを発展させ、Fig.1に示すような厚肉筒状角組系組物を対象として、機械化するための経路図の設計方法や最適組系数を決定する式を導き組系の配置方法を明らかにする。

またそれらの組物を羽車方式3次元組機で製作するための羽車の設計・配置についても検討し、さらに部品の交換などにより中実角組系組物・筒状角組系組物など任意断面角組系組物を組むことができる組機を製作する。この組機で製作される角組系組物は、使用目的に合わせて組系の経路を設計し、側壁の厚みやその形状を自由に変更することが可能で、複合材料のプリフォームとしての有用性と自由度の高い設計を可能にするものである。

Fig. 1 Coupled square braids with hollows.

Fig. 2 Design method of the bundle path diagram of a 8x8 square braid with a hollow.

2. 筒状角組系組物

筒状角組系組物とは内部に空洞・空隙部分を有する角組系組物である。筒状角組系組物を機械化するための手順は、次の通りである。

- (1)経路図を設計し、羽車の種類と配置を検討する。
- (2)安定組糸数を計算する。
- (3)羽車を並べ、組糸を配置する。

以下にその詳細を述べる。

2.1 筒状角組系組物の経路図の設計方法

筒状角組系組物の経路図の設計は、角組系組物の経路図の設計方法を発展させて、次のように行う。その1例としてFig.2に外周8×8角組、内包される空隙部分6×6角組の筒状角組系組物の設計方法を示す。

- (1)所望の組物の断面の概略図を描く。
- (2)外形の畝数を決め、中実組物の経路を描く。
- (3)筒状にするために、必要な厚みを決定して残し、内包される空隙部分の経路を消す。
- (4)羽車の配置が可能かどうか検討し、内側の畝山を描きかど部分の経路をつなぐ。

このようにして設計した経路に羽車が設置可能かどうかを確認するため、羽車配置の検討はFig.3のように行う。まずFig.3左図のようにかど部分を含む外周の各畝山と経路で囲まれた場所に1個ずつ設置する。次に、Fig.3中央図のように、かど部分の畝山を除く相対する辺の畝山の中央部を縦横に結ぶ線の交点がある経路で囲まれた部分に、1個ずつ○印の位置に設置する。Fig.3右図はその結果得た羽車配置図である。これは前報[7]で述べたように外周部の羽車は、かど部分の畝山と2交点を通るように、また外周の各畝山と3交点を通るように、内部の羽車は外周部の羽車と接しつつ4交点を通るように配置するからである。したがって隣接する外周の畝と内周の畝について畝山が対称とならない場合、また、内包する空隙部分が複数の時、隣接する空隙部分の内周の畝と内周の畝の畝山が対称でない場合、羽車を配置する場所がなくなり、組物は製作できない。

Fig.4に8×8角組の羽車配置図と相対する辺の畝山の中央部を縦横に結んだ羽車設置可能な位置を示す。筒状内部の空隙のために消す部分の畝山は、Fig.4内部の○印羽車を結ぶ直線のいずれかの上を通過すれば必ず羽車の

Fig. 3 Horn gear arrangements of a 8x8 square braid with a hollow.

Fig. 4 Horn gear arrangements for a 8x8 hollow square braid.

Fig. 5 An example of bundle path diagrams and horn gear arrangements of 8x8 hollow square braids.

Fig. 6 Uneven-rib square braids with a hollow.

Fig. 7 The number of bundles of the opening section.

設置は可能である。それ以外は羽車の設置ができず、羽車方式組機での製作は不可能である。Fig.5は羽車の設置可能なように内部の空隙部分を消した図とその結果得られた筒状角組系組物の経路図と羽車の配置図の例である。Fig.6は隣接する外周の畝と内周の畝は畝山が対称でない場合の経路図の例である。この図の内側の畝山部分には羽車を設置することができず、経路の方向転換ができない。したがってこれらの組物は羽車方式組機での製作は不可能である。

2.2 筒状角組系組物の安定組系数の決定方法

筒状角組系組物の安定組系数について考察する。機械化するためには安定組系数を知ることが必要である。この場合の安定とは、各組系が常に1本ずつ交互に交差して組織を構築していく場合である。1本ずつ交互に交差せず組系が順番待ちをしている状態では組系間に遊びが生じる。したがって、各経路の交点上と外周の経路上に各組系が1個ずつある時が組物の構造上最も安定していることになる。そこでその経路図において最も安定した組系の数を調べ、安定した筒状角組系組物の組系数(安定組系数)を決定する式を導く。

筒状角組系組物の安定組系数は外周の畝数から割り出した中実組物から内包される空隙部分の交点数を引いたものであるから、普遍的に安定組系数を計算する方法として畝数をパラメータとして次のように筒状角組系組物の安定組系数の決定の式を導いた[7]。

外周角組系組物の側面畝数をA,正面畝数をBとすると、外周角組系組物が中実組物の場合の組系数Nfは次式で表される。

$$Nf = 2AB + A + B - 4 \quad (1)$$

同様に、内包される空隙部分の側面畝数をa,正面畝数をbとすると、内包される空隙部分が中実組物の場合の組系数Niは次式で表される。

$$Ni = 2ab + a + b - 4 \quad (2)$$

内包される空隙部分の交点数Nvは、Fig.7に示すようにNiから内包する空隙部分の外周畝上の組系数Niと交点上の組系数N2およびその外周より1列内側に入った交点上の組系数N3を除いたものであるから、Nvは次式で表される。

$$Nv = Ni - (N1 + N2 + N3) \quad (3)$$

N1, N2およびN3は次式で表される。

$$N1 = 2a + 2b - 4 \quad (4)$$

$$N2 = 2(a - 1) + 2(b - 1) \quad (5)$$

$$N3 = 2(a - 2) + 2(b - 2) \quad (6)$$

したがって、内包される空隙部分の交点数Nvは次式で表される。

$$Nv = 2ab - 5(a + b) + 12 \quad (7)$$

式(1)と(7)より、筒状角組系組物の安定組系数Nhは次のように求められる。

$$\begin{aligned} Nh &= Nf - Nv \\ &= (2AB + A + B - 4) - \{2ab - 5(a + b) + 12\} \\ &= 2AB + A + B - 2ab + 5(a + b) - 16 \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 筒状角組系組物の羽車の種類と配列

筒状角組系組物を組む場合の羽車のホンドックの数と配列について検討する。ホンドックの数は製作する組物によって異なり、経路の交点が羽車の接点となる。Fig.8に6×8筒状角組系組物を製作する場合の羽車と組系の配置を示す。羽車の配置において、かど部分は畝山と2交点を通るように、また外周は各畝山と3交点を通るように、そして内部はそれらの羽車と接しつつ4交点を通るように配置する。筒状角組系組物の場合、内部にも畝山があ

Fig. 8 The bundle path diagram and the horn-gears arrangement of a 6x8 hollow square braid.

り、この畝山は外周の畝山または内部にある他の空隙部分の畝山と相対している。この内部の畝山と経路に囲まれた部分にも羽車を1個ずつ配置する。

かど部分以外の外周部分に配置する羽車と内部の畝山と経路に囲まれた部分に配置する羽車は、ホーン Dock 5 個をもつ羽車、またはそれと全く同じ機能をもつ待避機構付きのホーン Dock 4 個の羽車を使用することが適切である。待避機構[8]付きのホーン Dock 4 個の羽車とは、畝山部分のホーン Dock にスピンドルが来た場合一旦そのホーン Dock からスピンドルを取り出し順番待ちをし、次のホーン Dock に戻すための機能を備えたものである。ホーン Dock 5 個をもつ羽車または待避機構付きのホーン Dock 4 個の羽車を使用する理由は次の通りである。安定組糸数の場合、畝山にはいつも組糸が一つずつ配置されている。しかも同じ畝山にはいつもその同じ経路を通る組糸グループの一つがある。経路図の周辺部分つまり畝山部分の羽車で方向転換をするが、この部分の左右どちらかに同じ経路のボビンをもったスピンドルが来ているので、空きのホーン Dock が1個必要となる。空きのホーン Dock がない場合は左右から交互にボビンをもったスピンドルが来るので、次のスピンドルと衝突することになる。内部の畝山と経路に囲まれた部分の羽車は畝山上の組糸の他に交点が3個あり、これに空きのホーン Dock を1個加えたホーン Dock 5 個の羽車または順番待ちをするための待避機構付きのホーン Dock 4 個の羽車を使用することが適切となる。

3. 角組系組物の機械製作

以上の理論に基づき、角組系組物を組む羽車方式組機を製作する。羽車方式組機のしくみを Fig. 9 に示す。中実角組系組物の製組方法については、すでに述べたように、かど部分と直線の経路で囲まれた内部部分はホーン Dock 4 個の羽車を用いる。畝山部分にはホーン Dock 5 個の羽車または待避機構付きのホーン Dock 4 個の羽車を用いる必要がある。ホーン Dock 5 個の羽車または待避機構付きのホーン Dock 4 個の羽車におけるスピンドルの移動の比較を Fig. 10 に示す。待避機構付きのホーン Dock 4 個の場合、スピンドルは待避機構の部分で一旦ホーン Dock からはずれ、1工程後でホーン Dock に復帰する。

Fig. 10 Spindle movement on horn-gears.

Fig. 9 Proposed rotary braiding machine system.

ここでホーン Dock 5 個の羽車と待避機構付きのホーン Dock 4 個の羽車のどちらを用いるかについて検討した。ホーン Dock 5 個の羽車を用いる場合、スピンドル受渡しを滑らかにするには周速度を調節しなければならないので変速ギアが必要となる。また羽車のサイズはかど部分や内部、外周部分でホーン Dock の位置がずれないように直径の違う羽車を使用する必要がある。一方待避機構付きのホーン Dock 4 個の羽車を使用する場合は、すべての羽車が同じサイズのホーン Dock 4 個の羽車となり、周速度を調節する必要がないので変速ギアを必要としない。

したがって、理論的にはホーン Dock 5 個をもつ羽車とまったく同じ機能をもつ待避機構付きのホーン Dock 4 個をもつ羽車を採用した。待避機構付きのホーン Dock 4 個をもつ羽車を使用した中実角組・筒状角組系組物の羽車配置図の例を Fig. 11 に示す。待避機構付きのホーン Dock 4 個をもつ羽車を使用する場合、この組機はすべての羽車が等速で回転し、しかもスピンドルの衝突がない設計法に基づくため、変速ギアやコンピュータを必要としないものである。

今回は 6×8 角組系組物を最大限とする中実角組系組物を製作することができる組機で、かつ補強のための中央糸が挿入可能なものとした。中央糸は羽車の中央から1本ずつ引き出されるように設計したので最大で48本になる。 6×8 角組系組物の場合、スピンドルがもつ組糸数は106本となるので中央糸との合計は154本となる。

Fig. 11 The arrangements of horn-gears with sidetrack mechanisms for the rotary braiding machine.

Fig. 12 3-D rotary braiding machine for hollow braids.

できあがった羽車方式3次元組機をFig.12に示す。引き上げ速度は7.2 mm/s~2.4 mm/sとし、任意の組角度が得られるように羽車の速度は可変となっている。

この組機を運転した結果、スピンドルは衝突することなく滑らかに交互に移動し6×8角組系組物を組むことが可能であった。したがって安定組糸数の計算方法および羽車の配置方法が正しいことを立証できた。この組機は、6×8角組系組物以内の畝数の組物であれば軌道および羽車の配置変換により任意の中実角組系組物を製造することができる。

製作した中実角組系組物羽車方式組機は軌道および待避機構付き羽車の配置変換により筒状角組系組物を組むことが可能である。Fig.10右図のように筒状角組系組物の内部の畝山と経路に囲まれた部分と外周畝山部分に配置する羽車は待避機構付きのホーンダック4個の羽車を使用する。かど部分と直線の経路で囲まれた内部部分はホーンダック4個の羽車を用いる。Fig.13に、実際に作製した中実角組系組物と筒状(中空)角組系組物を示す。

この組機を運転した結果、スピンドルは衝突することなく滑らかに交互に移動し6×8筒状角組系組物を組むことができた。以上のようにこの組機は6×8以内の畝数の組物であればトラックプレートおよび羽車の配置変換により組むことが可能である。これにより同じ組機から違う断面を持つ組物を製造することが可能となり、羽車などをユニット化し、多様な組物に対応できる組機の開発が成功したといえる。

4. 結 論

複合材料のプリフォームとしての組物の合理的な補強形態を得ることを目的とし、厚肉の筒状角組系組物を取りあげ、機械化するために必要な経路の設計方法を明らかにした。さらに筒状角組系組物の安定組糸数を決定する式を導き、それを機械で製作するための羽車の配置およびホーンダックの数など、設計方法を明らかにした。本設計手法はL, C, T, I 型など複雑な断面をもつ組物の設計にも有効である。またこの設計理論に基づきスピンドルの移動機構

Fig. 13 A 6x8 square and a 6x8 hollow square braid.

をユニット化することで様々な形状の組物作製に対応できる組機の設計を行い、羽車方式組機を製作した。この羽車方式組機を実際に運転し、中実角組、筒状(中空)角組を製作することができた。

本研究では任意の形態に対して合理的な組構造を決定する設計技術を確認すると共に、その組構造を有する3次元繊維補強体プリフォームを連続生産する製造機械の設計・試作に成功したといえる。

今後は樹脂成形機に組物を連続的に供給し、3次元組物補強による樹脂複合材料の製造を行い、得られた複合材料の物性などの研究を行う必要がある。

謝 辞

本研究にあたりご助力ご協力いただきました村田機械株式会社の魚住忠司氏ほかスタッフの皆様へ深く謝意を表します。本研究の一部は科学技術振興事業団の研究委託により行いました。

文 献

1. G.W. Du and F.K. Ko, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* **12**, 752 (1993).
2. B. Obolenski, *Band und Flechtindustrie* **4**, 96 (1994).
3. H. Hamada, A. Nakai, A. Fujita, Z. Maekawa, A. Yokoyama and T. Uozumi, *Science and Engineering of Composite Materials* **4**, 109 (1995).
4. J.W.S. Hearle and G.W. Du, *Journal of Textile Institute*, 360, (1990).
5. T.D. Kostar and T.W. Chou, *Composite materials*, 217 (1999).
6. M. Schneider, B. Wulforth and A. Pickett, *Proceedings of Tex Comp Kyoto*, O-5-1(1998)
7. M. Tada and H. Hamada, *Seni-Gakkai-Shi*, in printing.
8. T. Uozumi and H. Tsuji (Muratec Co.), *Japan Patent Pending number P200211SMK* (2001).