

ガラス織物の楕円ドーム形状の成形と数値シミュレーションの比較

日大生産工(院) ○長見 茂 日大生産工 邊 吾一
日大生産工 坂田憲泰

1. 緒言

ガラス繊維強化プラスチック (Glass Fiber Reinforced Plastics, GFRP) は比強度, 耐熱性, 耐久性等に優れているため, 住宅機材, 舟艇・船舶, 車両等幅広い分野で使用されている. GFRP 構造物の成形方法には, ハンドレイアップ法, スプレーアップ法, フィラメント・ワインディング法など, 様々な方法が用いられているが, 近年, GFRP 構造体の性能と品質向上, 作業環境の改善, 設備投資費の抑制などから RTM 成形が注目されている. RTM 成形の一種であるインフュージョン成形は, 成形型の上にプリフォームを配置し, その上をバッキングフィルムで覆い, 成形型内を真空にして, 樹脂を流す簡易的なクローズドモールド成形法である. しかし, 樹脂の含浸時間を短時間にすることや, 成形時のドライスポットの低減を図るためには, 樹脂注入口や減圧吸引口の配置などの成形条件を最適化する必要がある. 成形を繰り返して合理的な条件を見つけることも可能だが, コストと時間が多くかかるため, 数値シミュレーションで樹脂の流れを予測し, 成形条件を最適化する方法が有効となる. 本研究では, インフュージョン成形で GFRP 製のドーム状の構造を成形するために, 樹脂含浸成形解析ソフトウェア PAM-RTM (日本イーエスアイ) を用い, 樹脂注入口と減圧吸引口の位置を変化させた場合の樹脂の流動時間の比較と, ドライスポットの発生について検討した結果について報告する.

2. 浸透係数

インフュージョン成形における樹脂の流動挙動は Darcy 則に従うことが知られており, 数値シミュレーションにおいては, 浸透係数 k が重要なパラメータの一つとなる. 浸透係数の測定には多くの方法¹⁻³⁾が提案されているが, 本研究では, 繊維への樹脂の供給量から浸透係数を求めた⁴⁾.

繊維にはガラスクロス (日東紡, WEA 22F) を 4 ply 用い, 樹脂にはサンドーマ (DH マテリアル, XPC-109), 硬化剤にはパーメック N (日油株式会社, F00011) を使用し, 硬化剤の重量比は 1% とした. 使用したガラスクロスは Fig.1 のように細い繊維 (縦糸方向, Warp) と太い繊維 (横糸方向, Weft) で編み込まれている. また, 大型 GFRP 構造物の成形では通常, 樹脂の流動を促進するためにフローメディアを使用するが, 本研究で使用したフローメディア (エアータック, GREEN FLOW 75) は Fig.2 に示すように対角線の長い方向で 5 mm, 短い方向で 3 mm となっている. 後述する数値シミュレーションでは, 繊維とフローメディアの方向は固定し, ドーム形状の長軸方向を繊維縦糸方向とフローメディアの対角線の長い方向の組合せ, ドーム形状の短軸方向を繊維横糸方向とフローメディアの対角線の短い方向の組み合わせとした.

粘度は音叉型振動式粘度計で測定した値 (0.143 Pa・s), 基材の断面積には計測値 (263 mm²), 樹脂密度はカタログ値 (1081 kg/m³) を用い, 空隙率は平板の成形サンプルから燃焼法で求めた値 (0.693) を用いた. 圧力差の値は大気圧と真空圧の差となるが, 樹脂は型に流れるまでにチューブ内を通るため, 圧力損失を考慮して 94.5 kPa とした. また, 平板の成形サンプルの実験から求めた浸透係数を Table 1 に示す.

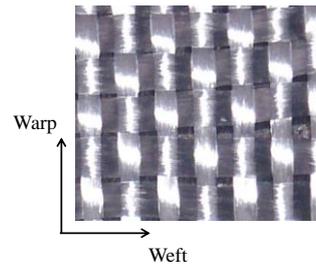
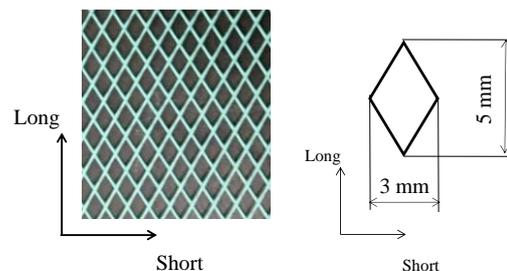


Fig.1 Warp and weft directions of glass-woven fabric.



(a) Whole view (b) Magnified view
Fig. 2 Long and short directions of flow media.

Table 1 Permeability values.

| Permeability k (10^{-10} m^2) | Glass-woven fabric : Warp Flow media : Long | Glass-woven fabric : Weft Flow media : Short |
|--|--|---|
| | 56.8 | 30.2 |

3. 実験結果と数値シミュレーション結果の比較

成形には 3D プリンターで作成した Fig.3 の樹脂型を用いた. 成形条件は 2 節と同様にし, 樹脂注入口と減圧吸引口は Fig.3 の①と②とした. 樹脂注入から 7 秒後のフローフロントの比較を Fig.4 に示す. 数値シミュレーションでは, Fig.4(a)に示すようにフローフロントの位置は概ね一定で推移し, 繊維全体に樹脂が含浸するのに要した時間は 28 秒となった. 一方, 実験では繊維全体に樹脂が含浸するのに要した時間は 24 秒と数値シミュレーションより早くなったが, これは Fig.4(b)に示すように, 成形型上側のフランジ部近傍に発生したバッキングフィルムの皺の影響と考えられる.

4. 数値シミュレーションを用いた樹脂注入口と減圧吸引口の検討

ドライスポットの発生がなく、繊維への樹脂含浸時間が最短となる成形条件を検討するために、樹脂注入口と減圧吸引口の位置を変化させた場合の数値シミュレーションを行った。樹脂注入口と減圧吸引口の位置は Fig.3 の 5 箇所とし、樹脂注入口と減圧吸引口の組合せは Table 2 の 8 パターンを考えた。

数値シミュレーションの結果を Table 3 に示すが、表中の「No」がドライスポットの発生なし、「Existence」がドライスポットの発生ありを示している。また、Fig.5(b)に示すように十分に含浸された要素（赤色）に囲まれた未含浸要素（青色）をドライスポットとして扱った。Table 3 より、本条件下では中央部から樹脂注入を行い、短軸側 2 箇所から減圧吸引する Table 2 の成形条件IVが最適な組合せとなった。

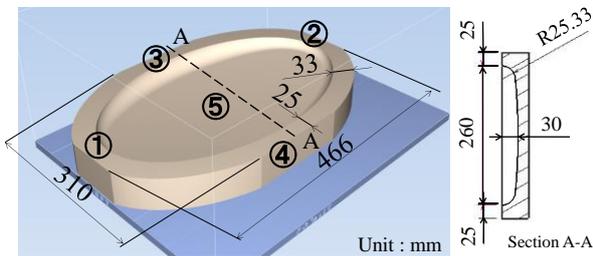
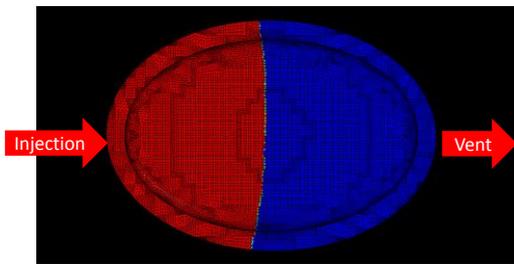
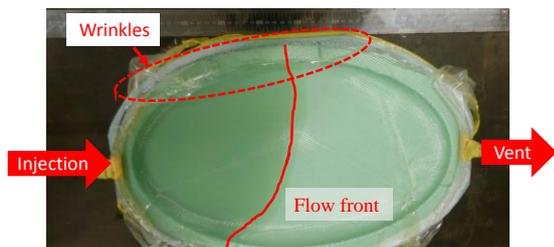


Fig.3 Injection and vent positions.



(a) Simulation results



(b) Experimental result

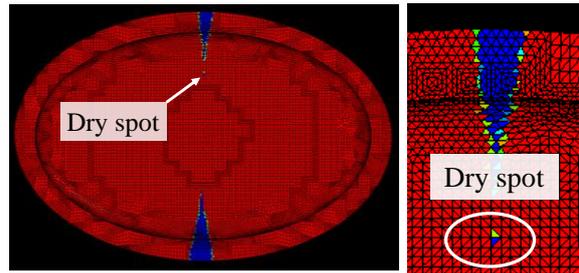
Fig.4 Comparison between simulation and experimental results after 7 sec from start.

Table 2 Fabrication conditions.

| | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| I | Injection | Vent | — | — | — |
| II | — | — | Injection | Vent | — |
| III | Vent | Vent | — | — | Injection |
| IV | — | — | Vent | Vent | Injection |
| V | Injection | Injection | — | — | Vent |
| VI | — | — | Injection | Injection | Vent |
| VII | Injection | Injection | Vent | Vent | — |
| VIII | Vent | Vent | Injection | Injection | — |

Table 3 Simulation results of resin impregnation time and dry spot.

| | Resin impregnation time | Dry spot |
|------|-------------------------|-----------|
| I | 28 sec | No |
| II | 17 sec | No |
| III | 8 sec | No |
| IV | 6 sec | No |
| V | 8 sec | Existence |
| VI | 8 sec | Existence |
| VII | 10 sec | Existence |
| VIII | 8 sec | Existence |



(a) Whole view (b) Magnified view

Fig.5 Simulation results of Type V.

5. 結 言

- (1) 樹脂の供給量から求めた浸透係数を用いて、ドーム形状の樹脂流動実験と数値シミュレーションを行った結果、実験ではバギングフィルムの皺の影響を受けたが、両者の含浸時間は概ね一致した。
- (2) 数値シミュレーションの結果、成形時間が最短でドライスポットの発生がない条件は、中央部から樹脂注入を行い、短軸側 2 箇所から減圧吸引する方法となった。

謝辞

本研究は、平成 26 年度研究科特別経費(学生分)の補助を受けたものであり、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) Ferland Pierre, et al. : Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer molding, Polymer composites, 17, 1 (1996), 149-158.
- (2) J.R Weitzenböck, et al. : Radial flow permeability measurement. Part B: Application, Composites part A: applied science and manufacturing, 30, 6 (1999), 797-813.
- (3) E. Poodts : FE analysis and production experience of a sandwich structure component manufactured by means of vacuum assisted resin infusion process, Composites: Part B, 53(2013), 179-186.
- (4) 長見茂, 坂田憲泰, 邊吾一 : インフュージョン成形を用いたドーム形状の数値シミュレーション, 第 39 回複合材料シンポジウム, 37-38(2014).