

FEM 解析を用いた FRP 製圧力容器の構造設計に関する研究

日大生産工（院）	○北垣内 康太	日大生産工（院）	染宮 聖人
日大生産工	平山 紀夫	日大生産工	坂田 憲泰
金沢工業大	鵜澤 潔	東京農工大	小笠原 俊夫

1. 緒言

近年 CO₂排出量の削減が喫緊の課題となっているなか、CO₂を排出しない水素エネルギーが注目されている。一般的な水素の貯蔵方法は水素を高压で圧縮し貯蔵するため、貯蔵容器には比強度・比剛性に優れた繊維強化プラスチック（以下、FRP）製圧力容器が採用されている。今後、水素を燃料とする自動車やドローン等の本格的な商品化が期待されている。しかしながら、これまでのFRP製圧力容器は、ロービングを回転するアルミ製ライナーに巻き付けていくフィラメントワインディング法で製造されており、生産性が低いことや、繊維の巻き付け角度およびアルミ製ライナーの形状に制約があった。そこで、FRP製圧力容器の構成部品を別々に製造し、それらを後工程により接合して一体化する新しい製造方法が検討されている。この製造方法であれば、従来の制約に縛られない自由な設計が可能で、FRP製圧力容器の生産性が向上できると期待される。

そこで本研究では、有限要素法（以下、FEM）解析を用いて、接合方式で製造するFRP製圧力容器の構造設計を行う。本報告では、FRP製圧力容器の繊維配向角を5°刻みで変化させる感度解析を実施し、最適な繊維配向角を明らかにした。

2. 接合方式による FRP 製圧力容器

FRP製圧力容器のマトリックス樹脂は熱可塑性樹脂を用いているため、FRPをガラス転移温度以上に加熱すると軟化・再熔融し、二次加工や接合が可能となる。そこで、新しい製造方法では、Fig.1 に示すアルミ製ライナーに、別工程で成形したFRP円筒を被せ、一定の温度を与えることで、アルミ製ライナーの形状に二次加工しながら、FRP同士を接合する方式を採用した。ここで、FRP円筒

はライナーのドーム部に沿うように被せる必要があるため、Fig.2 に示すように、FRP円筒の両端部に切り込みを入れている。

以上のように、FRP製圧力容器の各構成部品をそれぞれ製造した後、簡便な組み立て工法で一体成形できれば、生産性の大幅な向上が可能であると考えられる。

3. FEM 解析

3.1 解析モデル

最適な繊維配向角を調査するにあたり、圧力容器の円筒部を再現した簡易モデルを作成した。解析に使用したモデルをFig.3に示す。

Fig.3 に示すように、板厚が1.5mmのアルミ円筒殻に炭素繊維強化熱可塑性樹脂（以下、CFRTP）を積層した。このときのCFRTP円筒殻の厚さは2.0mmとした。



Fig.1 3-D model of aluminum liner.

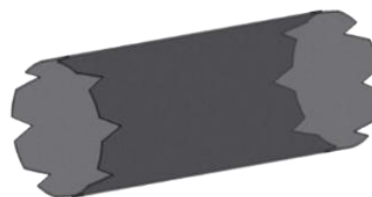


Fig.2 FRP cylinder model with incision.

3.2 FRP 積層部における繊維配向角の定義

FEM解析には汎用有限要素法ソフトウェア Ansys Mechanical™のプリポスト機能を用いて、1要素ごとに複数の層を内部的に定義し、材料と厚さ、繊維配向角を設定した。こ

ここで、CFRTP 円筒殻における繊維配向角の定義を Fig.4 に示す¹⁾。Fig.4 に示すように、繊維配向角は θ の層と $-\theta$ の層を交互に定義することで CFRTP 円筒殻の繊維配向角を再現した。本解析では、CFRTP 円筒殻の繊維配向角 θ を $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で 5° 刻みで変化させた感度解析を実施した。

3.3 境界条件

境界条件は両端のドーム面の X 軸方向の変位を固定し、モデル全体の回転を抑制するため、片側のドーム面のみ Y 方向の変位を固定した。荷重条件は FRP 製圧力容器の破裂基準圧力と同じ 100MPa（使用圧力×3.4 倍）を CFRTP 円筒殻とドームの内面に与えた。

4. 解析結果

アルミ円筒殻における周方向応力と軸方向応力、相当応力を Fig.5 に示す。Fig.5 に示すように、繊維配向角 θ が $\pm 60^\circ$ のときにアルミ円筒殻の相当応力が最も低減されていることが分かる。

次に、CFRTP 円筒殻の繊維軸方向の垂直応力を Fig.6 に示す。Fig.6 から分かるように、繊維配向角 θ が $\pm 55^\circ$ のとき、繊維直交方向の応力が最小となった。一方で、繊維軸応力は繊維配向角 θ が $\pm 55^\circ$ で最大となり、繊維が応力を最も効率的に負担できる角度は $\theta = \pm 55^\circ$ であることが確認できた。また、最大の繊維軸応力が炭素繊維軸方向の引張破断強度に達していないことから、FRP 製圧力容器の破裂基準圧力を満足できると推測される。

5. 結言

本研究では、FEM 解析を用いて、繊維配向角 θ を変化させた感度解析を実施した。その結果、FRP 製圧力容器の繊維配向角 θ は $\pm 55^\circ$ が最適であるとわかった。今後は、実際の FRP 製圧力容器を作製し、破裂試験の結果と解析結果を比較する予定である。

参考文献

- 1) 邊 吾一, 茂呂居玲, 太田浩, 天然ガス自動車用 FRP 圧力容器の構造解析, JHPI, Vol. 35, No. 2, (1997), p.43.

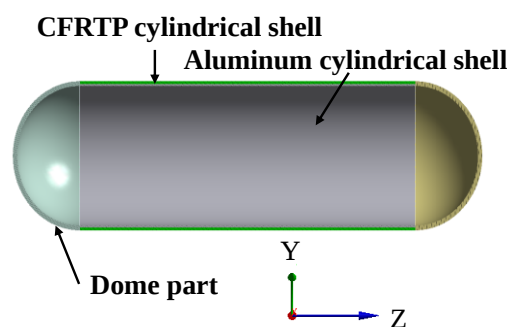


Fig.3 Schematic illustration of simplified analytical model.

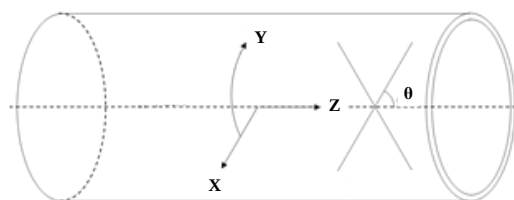


Fig.4 Lamination and angle of FRP pressure vessel.

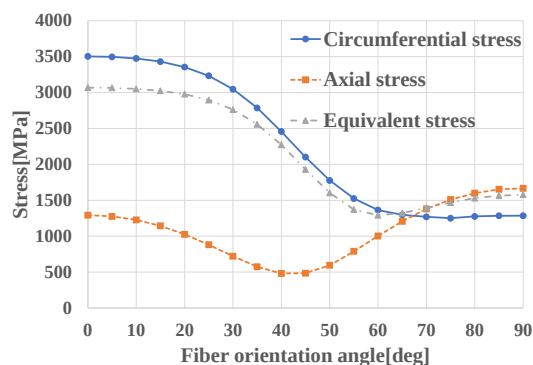


Fig.5 Relationship between fiber orientation angle and stress of aluminum liner.

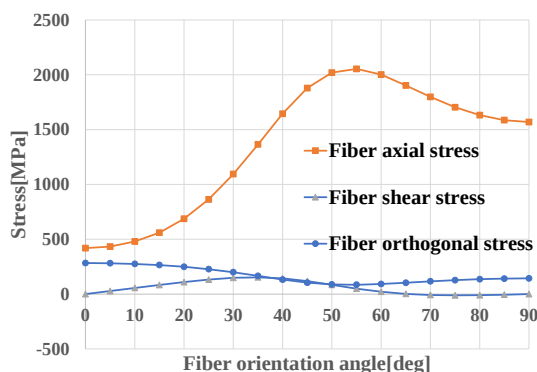


Fig.6 Relationship between fiber orientation angle of CFRTP and stress in each axial direction.