

ガラス長繊維強化硬質発泡ウレタン材料の力学的性質に関する一考察

鉄道総合技術研究所
鉄道総合技術研究所
鉄道総合技術研究所

正会員 ○西宮 裕騎
正会員 細田 充
正会員 本野 貴志

1. はじめに

硬質発泡ウレタンをガラス長繊維で補強した複合材料（以下、「FFU」と称す。）は、耐腐食性や絶縁性にすぐれているため、合成まくらぎを中心として広く鉄道分野で用いられている。

本研究で対象とする FFU は、一方向に繊維補強された複合材料であるが、方向によって弾性率が異なる異方性材料である。このため、等方性を仮定した弾性理論や数値解析手法を適用することは一般に困難である。そこで、本研究では FFU を用いた合理的な設計手法の確立に向けて、材料試験を実施して各方向の物性値を明らかにし、当該材料を適切に評価可能な FEM 解析手法の構築を行う。

2. 材料定数の測定

FFU は図 1 の 2, 3 方向の弾性特性が等しく、23 面内で等方となる横等方性弾性体である。この力学特性を記述するには、1, 2 方向の縦弾性係数 E_{11} , E_{22} 、12, 23 面内のポアソン比 ν_{12} , ν_{13} 、12 面内のせん断弾性係数 G_{12} の計 5 個の物性値が必要である¹⁾。等方性材料と異なり、 E_{11} と ν_{12} から G_{12} を関連づけることはできず、個別に求める必要がある。

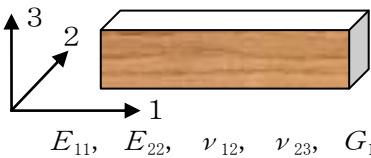


図 1 横等方性弾性体の弾性係数

材料定数を求めるために引張試験を行った。試験条件は JIS に規定された繊維強化プラスチックの試験条件²⁾を参考に設定した。JIS では試験片の厚さを 2～10mm と規定しているが、当該材料は繊維含有量のばらつきにより、弾性率が大きくばらつく可能性があるため、厚さを 15mm とした。比重 1.0 の FFU 材料を対象

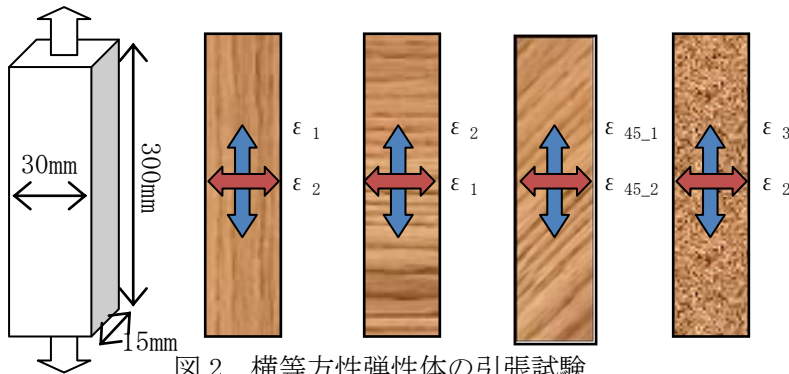


図 2 横等方性弾性体の引張試験

とし、繊維方向の異なる 4 種類の試験片を切り出し、裏表に 5mm のひずみゲージを貼り付けて各方向のひずみを測定した(図 2)。試験結果は次式により物性値と関連付けられる。

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\epsilon_1}, \nu_{12} = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}, E_2 = \frac{\sigma_2}{\epsilon_2}, \nu_{21} = -\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}, E_{45} = \frac{\sigma_{45}}{\epsilon_{45}}, \nu_{45} = -\frac{\epsilon_{45_1}}{\epsilon_{45_2}}, G_{12} = \frac{E_{45}}{2(1+\nu_{45})} \tag{1}$$

得られた材料定数を表 1, 2 に示す。ここで、繊維方向の引張強度は試験時にチャック部で破壊した場合の結果であるため、実際の引張強度はさらに高いと推定される。

表 1 材料定数の測定結果 (FFU 比重 1.0)

縦弾性率		ポアソン比		せん断弾性率	
方向	値 (N/mm ²)	方向	値	方向	値 (N/mm ²)
1	15900	12	0.33	12	528
2	1590	23	0.39	23	572
3	1590	13	0.33	13	528

表 2 引張破壊時の応力とひずみ (FFU 比重 1.0)

種 別	応力 (N/mm ²)	ひずみ (×10 ⁻⁶)
繊維方向	90.1※	5667※
繊維直角方向	5.4	3396
せん断方向	5.5	10417

※参考値

3. FEM 解析と静的載荷試験

FEM 解析の妥当性を確認する目的で、静的載荷試験とそれを模擬する FEM 解析を実施した。静的載荷試験は、図 3 に示す様に厚さ 60mm の FFU 板をスパン 2600mm で支持し、中央に載荷することにより実施した。FEM 解析モデルは対称性を考慮して右半分のみをモデル化し、実験と同等の荷重・拘束条件を設定した。物性値は表 1 の材料試験により得られた結果を使用し、静的線形解析を実施した。

4. 結果および考察

FEM 解析から得られた変形形状と応力分布を図 4 に、静的載荷試験と比較した結果を図 5 に示す。

梁の中央付近には繊維方向に高い引張応力が発生しているが、繊維方向強度は極めて高いため、問題とならない(図 4(a))。繊維直角方向の応力は、載荷治具端と支持点付近に引張強度と同程度の圧縮応力が発生していることから、この付近で破壊が生じる可能性が高いと推定される(図 4(b))。せん断応力は、支持点と載荷点との中心付近でせん断強度を超えている(図 4(c))。なお、実験では載荷治具端で最初の破壊が生じた。

荷重－変位関係は、載荷荷重 0～80kN の範囲で良好な一致を示している(図 5(a))。実験結果から、80kN 付近で供試体に局所的な破壊が生じたと考えられる。荷重－ひずみ関係からは、試験と比べて FEM 解析は若干柔らかめの傾向が確認できるが、設計で用いる場合には十分実用的な精度である(図 5(b))。

5. まとめ

ガラス長繊維強化硬質発泡ウレタン材料の力学的性質を明らかにするため、各材料方向の物性値を測定した。得られた物性値を基に FEM 解析を行った結果、実物実験との良好な一致が見られた。この手法により、材料に応じて様々な形状の FEM 解析を精度良く行うことができ、設計の合理化に用いることが可能となった。

今後、当該材料に適合する破壊モデルを選定し、合理的な設計手法の確立に向けた検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 末益博志他：入門 複合材料の力学、培風館、2009 年。
- 2) 日本工業標準調査会：プラスチック—引張特性の試験方法—第 4 部：等方性及び直交異方性繊維強化プラスチックの試験条件、日本工業規格、JIS K 7164、2005。

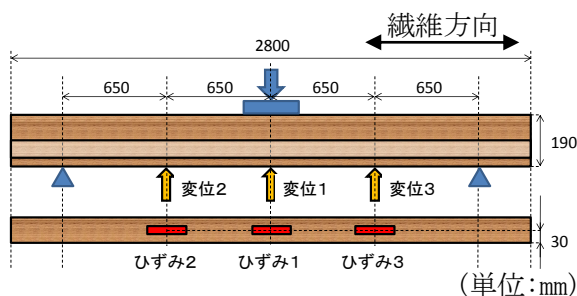
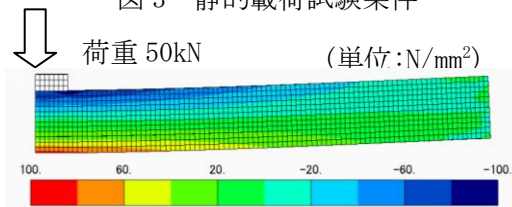
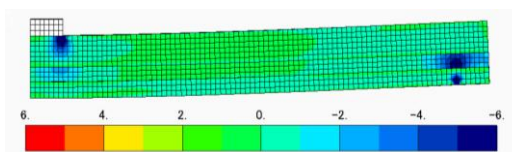


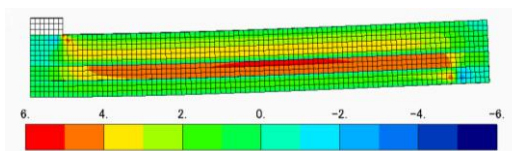
図 3 静的載荷試験条件



(a) 繊維方向応力

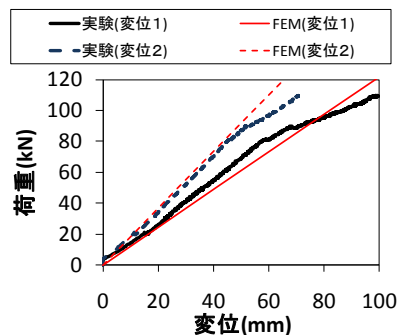


(b) 繊維直角方向応力

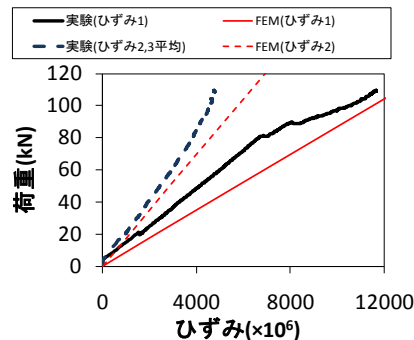


(c) 面内せん断応力

図 4 FEM 解析結果



(a) 荷重－変位曲線



(b) 荷重－ひずみ曲線

図 5 静的載荷試験と FEM 解析の比較