

合成まくらぎの直交異方性特性とねじくぎに対する横圧強度評価

鉄道総合技術研究所 正会員 ○西宮 裕騎

1. はじめに

合成まくらぎは耐腐食性や絶縁性にすぐれる軌道部材として広く用いられている。合成まくらぎは硬質発泡ウレタン樹脂をガラス長繊維で補強された複合材料（以下、「FFU」と称す。）であり、方向によって弾性率が異なる直交異方性材料である。過去に著者らは、特殊用途に適用するためにガラス長繊維の含有率が合成まくらぎよりも高いFFUを対象とし、材料試験を実施して直交異方性材料の力学特性を取得し、FEM解析を実施して妥当性を確認した¹⁾。しかし、一般的な合成まくらぎの比重が 0.74 ± 0.1 （JIS E 1203）であるのに対し、過去に妥当性を確認したFFUは繊維含有率が高いために比重が1.0と高く、繊維補強により繊維方向の縦弾性率が1.5倍程度である。このため、一般的な合成まくらぎの直交異方性を考慮した力学特性は明らかではない。また、レール締結装置との接合法として、ねじくぎによる締結が一般的に用いられ、JIS E 1203に引抜保証荷重が規定されている。しかし、水平方向の作用に対しては、レール締結装置の性能照査として実施された例はあるものの、ねじくぎ締結の特性に着目した研究事例は少ないのが現状である。そこで、本研究では合成まくらぎを用いた軌道の合理的な設計手法の確立に向けて、材料試験を実施して物性値を明らかにし、FEM解析モデルの構築を行うこととした。さらに、その適用例として横圧を想定した载荷試験を実施し、FEM解析結果と比較検証して横圧に対する強度の評価を試みた結果を報告する。

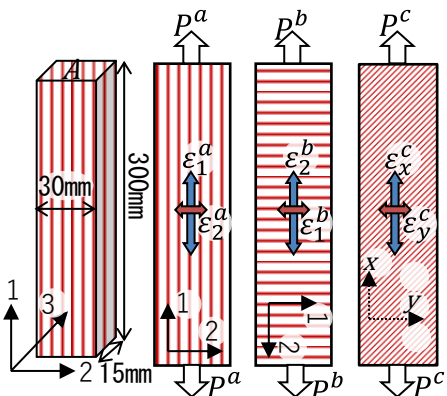


図1 異方性材料と試験片の繊維方向

表1 材料試験結果

縦弾性率		ポアソン比		せん断弾性率	
記号	値(N/mm ²)	記号	値	記号	値(N/mm ²)
E ₁	10476	ν ₁₂	0.31	G ₁₂	306
E ₂	816	ν ₂₃	0.39	G ₂₃	397
E ₃	816	ν ₁₃	0.31	G ₁₃	306

表2 引張破壊時の応力とひずみ

種 別	応力(N/mm ²)	ひずみ(×10 ⁻⁶)
繊維方向	78.9※	7537※
繊維直角方向	4.3	5212
繊維せん断方向	3.2	10540

※参考値

2. 材料試験

合成まくらぎは図1に示す様に、1方向に繊維補強され、繊維に垂直な2,3断面内では繊維が任意に配置され、方向によらず特性が一定であると仮定できる直交異方性材料である。この力学特性を記述するには、1,2方向の縦弾性係数 E_1, E_2 、12、23面内のポアソン比 ν_{12}, ν_{23} 、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²⁾。この物性値を求めるため、繊維方向の異なる3種類の試験片を5本ずつ製作し、各方向のひずみを測定した。試験片の寸法とひずみ方向の定義を図1に示す。得られた荷重とひずみは次式で物性値に換算した。

$$E_1 = \frac{\sigma^a}{\epsilon_1^a}, \sigma^a = \frac{P^a}{A}, E_2 = \frac{\sigma^b}{\epsilon_2^b}, \sigma^b = \frac{P^b}{A}, \nu_{12} = -\frac{\epsilon_2^a}{\epsilon_1^a}, G_{12} = \frac{E_{45}}{2(1 + \nu_{45})}, E_{45} = \frac{\sigma^c}{\epsilon_x^c}, \sigma^c = \frac{P^c}{A}, \nu_{45} = -\frac{\epsilon_y^c}{\epsilon_x^c}$$

なお、 ν_{23} については繊維より樹脂材のポアソン比が支配されると想定し、過去の試験で測定された値0.39¹⁾を適用した。得られた材料定数を表1,2に示す。試験片は、滑り防止のやすり目の平板つかみ具により油圧で挟んで固定しており、繊維方向の試験は、その固定箇所で破壊したため、実際の強度はさらに高いと考えられる。

3. 静的载荷試験とFEM解析

取得した直交異方性特性を用いてFEM解析モデルを構成し、その適用例として、合成まくらぎにねじくぎで締結した床板に対し、静的に横圧が作用した場合を想定し、FEM解析結果と比較検証した。

キーワード 合成まくらぎ、直交異方性材料、FEM解析
連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38
(公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道構造 TEL042-573-7275

3.1 静的載荷試験

在来線の分岐まくらぎに厚さ 30mm の床板を締結する構造を想定し、図 2 に示す条件で供試体を作成した。ねじくぎは JISE1109 の B 形を対象とし、供試体①②の 2 本を鉛直方向に 30mm の隙間を空けて締結した。載荷は床板を想定した鋼板により行い、載荷除荷を 3 回繰り返す 0kN→10kN→0kN→20kN→0kN→30kN→0kN のサイクルとした。変位は 1 供試体につき 2 点測定し、平均値を採用した。

3.2 FEM 解析

解析モデルを図 3 に示す。1 つの供試体を対象とし、得られた材料特性のソリッド要素を用い、ねじくぎ穴をモデル化した。ねじくぎは等方性材料の鋼材を想定したソリッド要素とし、ねじ部を省略した。そのねじくぎと合成まくらぎ間に接触を設定した。構築した解析モデルを用いて線形静解析を行った。

3.3 結果・考察

試験と FEM 解析で得られた荷重・変位曲線を図 4 に示す。荷重 10kN までは変位が 0.5mm 以下であり、線形関係を概ね保っている。この線形の範囲内で FEM 解析は試験結果と良好に一致している。一方、15kN 以上の荷重域では変位が増大する傾向が見られた。

試験後の供試体の状況を図 5(a)に示す。載荷により合成まくらぎの穴周辺には変形が確認された。FEM 解析で得られた荷重 10kN 時のねじくぎ周辺部のひずみ分布を図 5(b)に示す。試験結果と同様に、穴上部に局所的に高いせん断ひずみ分布が確認されたが、ねじくぎのネジ部のせん断ひずみは、表 2 に示す破壊ひずみ量の半分程度であった。図 5(b)の評価箇所において、1,2,3 方向の直ひずみと、12,23,31 方向のせん断ひずみを図 6 に示す。図 6 より、合成まくらぎのねじくぎ穴上部は、表 2 に示す破壊ひずみ量を上回る値を示しており、変形が生じるものと推定される。しかし、まくらぎ上面から-35~-110mm の範囲で、ねじ山の高さが最大の 3.5mm となるが、この範囲で発生するひずみ量は $2500 \mu\epsilon$ 以下であり、締結構造に問題は生じないものと推定される。

4. まとめ

合成まくらぎ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、直交異方性を考慮した FEM 解析モデルを構築した。横圧を想定した載荷試験を実施し、FEM 解析結果と比較検証した結果、両者は線形の範囲で一致した。今後は、合成まくらぎに適合する破壊則の適用を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 西宮裕騎、細田充、本野貴志：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、土木学会 第 66 回年次学術講演会、IV-088、2011.
- 2) 末益博志他：入門 複合材料の力学、培風館、2009.

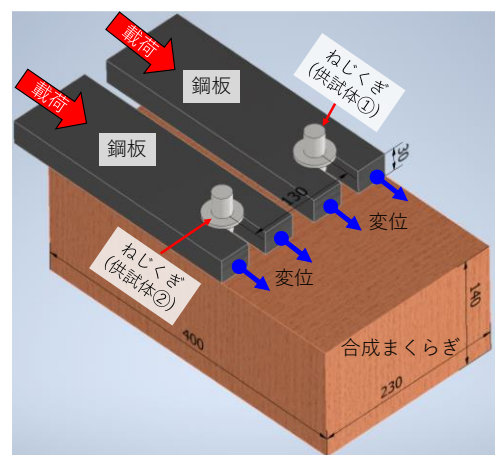


図 2 静的載荷試験条件

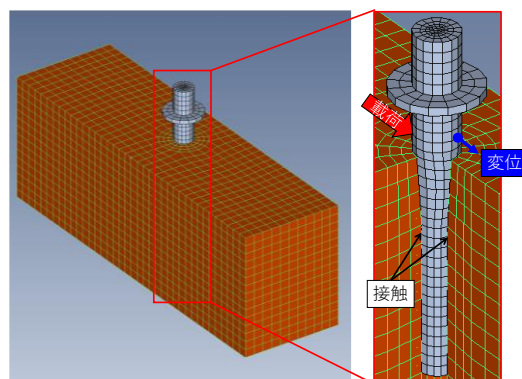


図 3 FEM 解析モデル

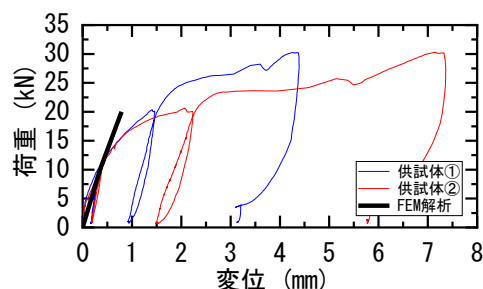
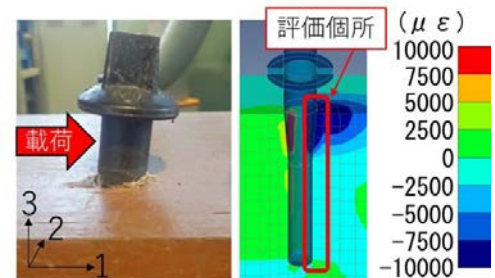


図 4 荷重・変位関係



(a)載荷後の状況 (b)繊維せん断方向ひずみ

図 5 静的載荷試験と FEM 解析結果

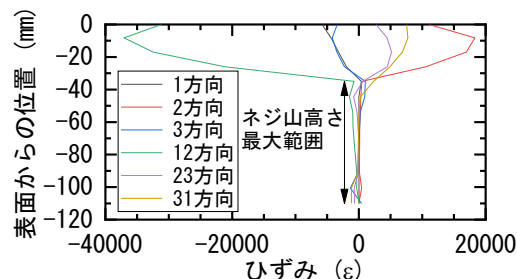


図 6 FEM 解析のひずみ量(荷重 10kN)