

CFRP 部材の形状が圧縮強度に与える影響に関する解析的研究

京都大学大学院工学研究科

学生員

○生島 広人

京都大学大学院工学研究科

正会員

松村 政秀

京都大学大学院工学研究科

正会員

杉浦 邦征

1. 研究背景および目的

繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Polymers: 以下 FRP と略記)には、ガラス繊維を用いる GFRP やカーボン繊維を用いる CFRP などが用いられている。FRP は軽量で耐久性に優れ、繊維方向に強度を発現することから、軸方向力が作用するトラス部材への FRP の適用を目指した研究が実施されている[1][2]。このとき、座屈の影響を強く受けるトラス部材の圧縮強度の算定には、詳細な検討を要する[1][3]。

本研究では、CFRP 部材の部材形状と圧縮強度との関係を定量的に評価することを目的に、同じ重量・板厚の箱型部材と円筒型部材の圧縮強度の理論値および解析値を比較する。

2. CFRP 部材の形状の詳細

トラス部材として、強度面で有利な円筒型部材を用いる場合には接合部の構造が複雑になり、板の座屈が生じる箱型部材を用いる場合には機械接合の採用が比較的内容易である。そこで、既製の引抜成形 CFRP 箱型部材を比較の基準とし、これと同じ重量、積層構成、板厚を有する円筒型部材との圧縮強度特性を比較する。

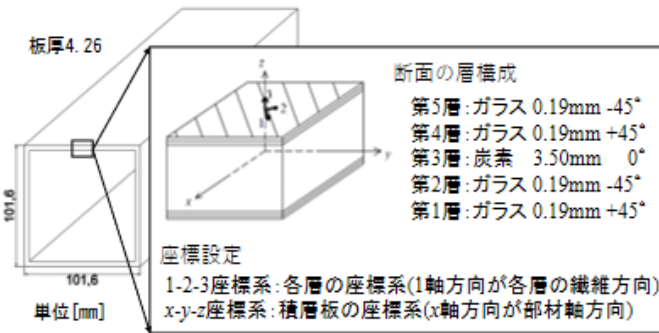


図 1 箱型部材の形状および寸法

箱型部材の形状および寸法を図 1 に示す。部材を構成する板は、エポキシ樹脂により硬化された CFRP と GFRP から成る積層板であり、各層の物性値は表 1 のとおりである。

表 1 物性値

(a) CFRP 層			
密度[g/cm ³]	縦弾性率[GPa]	剪断弾性率[GPa]	ポアソン比
1.60	E_1 : 140	G_{12} : 3.00	ν_{12} : 0.289
	E_2 : 11.2		ν_{21} : 0.0232
(b) GFRP 層			
密度[g/cm ³]	縦弾性率[GPa]	剪断弾性率[GPa]	ポアソン比
2.13	E_1 : 48.2	G_{12} : 3.26	ν_{12} : 0.261
	E_2 : 13.5		ν_{21} : 0.0729

円筒型部材の形状および寸法を図 2 に示す。部材長は箱型と円筒型で同じ値である。

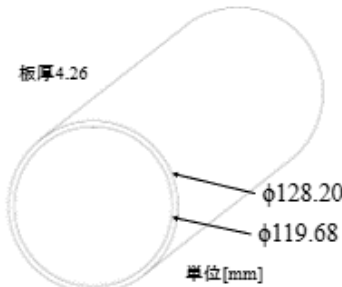


図 2 円筒型部材の形状および寸法

3. CFRP 部材の形状と圧縮強度の関係

3.1 圧縮強度の理論値

図 3 には箱型部材および円筒型部材の部材長 L と圧縮強度 σ_c の関係を示す。箱型部材の圧縮強度の理論値 $\sigma_c(box)$ は、文献[4]より、積層板の座屈強度 $\sigma_{cr}(plate)$ と箱型部材の柱としてのオイラー座屈強度 $\sigma_{cr}(column)$ のうちの最小値をとる。 $\sigma_{cr}(plate)$ は、式(1)によって計算できる。板の曲げ剛性を D_{ij} 、板厚を t 、板幅を b とする。

$$\sigma_{cr}(plate) = \frac{2\pi^2}{t \cdot b^2} (\sqrt{D_{11}D_{22}} + D_{12} + 2D_{66}) \quad (1)$$

$\sigma_{cr}(column)$ は、式(2)によって計算できる。ただし、オイラー座屈が生じる軸圧縮荷重を P_{cr} 、部材長を L 、部材断面積を S 、第 k 層の縦弾性率を $E_x^{(k)}$ 、断面 2 次モーメントを $I^{(k)}$ とする。

$$\sigma_{cr}(column) = \frac{P_{cr}}{S} = \frac{\pi^2 \sum_{k=1}^n E_x^{(k)} \cdot I^{(k)}}{R^2 \cdot S} \quad (2)$$

円筒型部材の圧縮強度の理論値 $\sigma_c(cylinder)$ は、文献[1]より、式(3)の軸対称変形座屈強度 $\sigma_{cr}(symmetric)$ 、式(4)の非対称変形座屈強度 $\sigma_{cr}(asymmetric)$ 、式(2)のオイラー座屈強度 $\sigma_{cr}(column)$ のうちの最小値をとる。ただし、部材の縦弾性率を E_x と E_y 、横弾性率を G_{xy} 、ポアソン比を ν_{xy} と ν_{yx} 、円筒外側での半径を r とする。

$$\sigma_{cr}(symmetric) = \sqrt{\frac{E_x \cdot E_y}{3(1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx})}} \cdot \frac{t}{r} \quad (3)$$

$$\sigma_{cr}(asymmetric) = \left\{ \frac{\sqrt{E_x \cdot E_y} + 2G_{xy}(1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx}) + E_x \cdot \nu_y}{\sqrt{E_x \cdot E_y} + \left(\frac{E_x \cdot E_y}{2G_{xy}}\right) - E_x \cdot \nu_y} \right\}^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma_{cr}(symmetric) \quad (4)$$

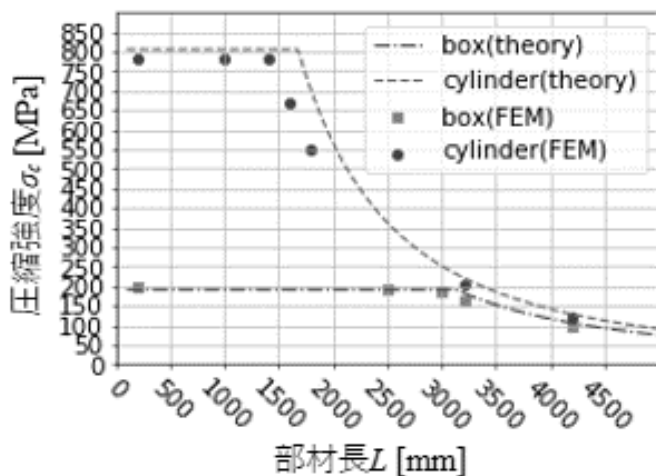


図 3 箱型部材と円筒型部材の理論値および FEM 解析値

3.2 圧縮強度の FEM 解析値

汎用解析ソフト ABAQUS CAE(ver.6.14)を用いて、箱型部材と円筒型部材のモデル化を行い、座屈解析を行った。平面応力状態を仮定してシェル要素を用い、境界条件は部材両端部で 1 方向のみ回転自由度を持つピン支持とし、部材端に圧縮荷重を載荷した。物性値は表 1 の値を用いた。部材長 L をパラメータとし解析した結果も図 3 にプロットしている。

3.3 圧縮強度の理論値と FEM 解析値の比較と考察

図 3 より、FEM 解析値と理論値は概ね一致していることが確認できる。

同じ部材長で比較すると、箱型部材よりも円筒型部材が大きな圧縮強度を示し、板の座屈の影響が小さい領域、すなわち部材長が 3230mm 以上の範囲では、両者の差は小さくなっている。

歩道橋設計では部材強度より橋のたわみが決定要因になる場合が多く、長い CFRP 部材を利用する場合が考えられる。また、その場合には、表面が平坦で機械接合などが容易な箱型部材が適している場合も考えられる。

4. 結論

本研究では、CFRP 製箱型部材と円筒型部材の圧縮強度を解析的に比較した。主な結論は次のとおりである。

- (1)両形状とも、圧縮強度の理論値と FEM 解析値は概ね一致している。
- (2)断面積・板厚・積層構成が同じ条件では、円筒型部材の方が箱型部材より、大きな圧縮強度を示す。部材長が大きいと、円筒型部材と箱型部材の圧縮強度はほぼ同じ値を示す。

以上から、部材長 3230mm 以上では、接合部の構造に応じて箱型部材の使用も考えられる。

今後は、実験により、破壊形状を踏まえた圧縮強度を検証する必要がある。

参考文献

- [1] 米丸啓介, 藤崎忠志, 杉崎健一, 中辻照幸: CFRP 製立体トラスの開発(その 1-CFRP の力学特性), 清水建設研究報告, 第 64 巻, p.41-47, 1996.
- [2] Xiao Yang, Yu Bai: Structural performance of a large-scale space frame assembled using pultruded GFRP composites, Composite Structures, Volume 133, 1 December 2015, Pages 986-996, 2015.
- [3] 山田聖志, 中澤博之, 小宮巖: 引抜成形 FRP 柱材の圧縮力による崩壊メカニズム, 強化プラスチック, 第 46 巻, 6 号, p.238-p.244, 2000.
- [4] 土木学会: FRP 歩道橋設計・施工指針(案), 2011.