

CFRP 薄肉円筒に対する圧縮座屈実験

包 景軒 (神奈川大・院), 高野 敦 (神奈川大), 喜多村 竜太(神奈川大)
Jingxuan Bao, Atushi Takano, Ryuta Kitamura (Kanagawa University)

1. 研究背景

薄肉円筒の座屈強度のばらつきに関する研究は半世紀以上に渡って行われているが、いまだその原因は明らかにされていない。また、形状不整を有限要素法解析モデルに取り込んで非線形解析を行った研究もあるが^[1]、その結果、実測値は解析値に対して5~10%低い結果を示している。また、事前に円筒を製造してその形状不整を測定する必要があるため、製造前の予測には適用出来ず設計には向かない。

従来の研究では、積層重なり/ギャップ、半径と肉厚の比 r/t 、長さ半径の比 L/r 、CFRP の種類、楕円形状の形状不整に着目したが、回帰分析の結果、有意な結果とならなかった。また、円筒試験片をオフセットした圧縮試験を行ったところ、形状が乱れている方向の座屈強度が低いという傾向が見られた^[2]。また、CFRP 薄肉円筒試験片の軸方向の形状不整は、ノックダウンファクタ(KDF)にどのような影響を与えるかを調べるところ、鼓変形に対して感度が見られた^[3]。

一方で図1に示すように金属円筒の r/t -KDF は右肩下りの傾向を示すが^[4]、複合材料は図2に示すようにそのような傾向を示さず、 r/t の大きい範囲のデータもない^[5]。

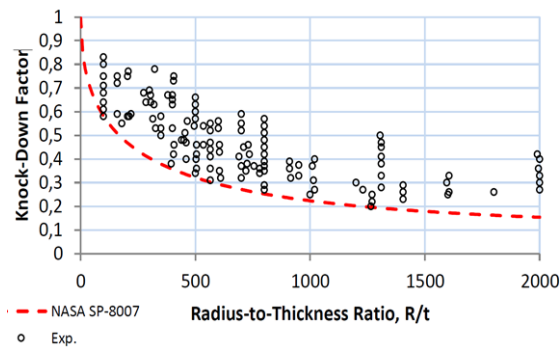


図1 金属円筒の r/t -KDF 線図^[4]

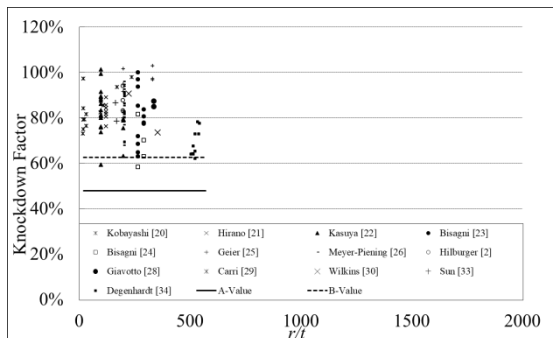


図2 複合材料円筒の r/t -KDF 線図^[5]

2. 研究目的

そこで、本研究では r/t の大きい範囲のデータ取得とその評価を目的として、 $r/t=100/0.112=893$ のCFRP 円筒試験片を製作し、圧縮座屈実験を行った。更に、圧縮座屈実験前後で円筒試験片の形状を測定し、KDF との関係性を調査した。

3. CFRP 円筒試験片の設計・製作

3.1 円筒試験片の材質と各パラメータ

円筒殻の材質はHSX350C075S(以下HSX型と呼ぶ)。HSX型のプリプレグの厚さは0.056mmである。繊維方向の弾性率は260.3GPaである。円筒試験片の各パラメータを表1に示す。

表1 円筒試験片の各パラメータ

積層構成	半径 r [mm]	肉厚 t [mm]	長さ L [mm]	L/r (長さ/直径)	r/t (半径/肉厚)
(-50/50)	100	0.112	200	2	893

3.2 円筒試験片の製作

図3に示すように、この円筒殻は柔らかく、指で押すだけでも変形してしまい、試験時に円筒が倒れてしまう。



図3 変形させた円筒殻

そこで、円筒の倒れを抑えるために、接着用柱型に治具リングを固定した(図4)。次に、円筒殻を2mmの治具リングの溝に嵌める(図5)。さらに固定用板①を用いて円筒殻を拘束した(図6)。その後、接着剤を治具リングの外側の溝に流し込んだ。最後に外側の接着剤を乾燥した後に、内側の溝に接着剤を流し込んだ(図5)。

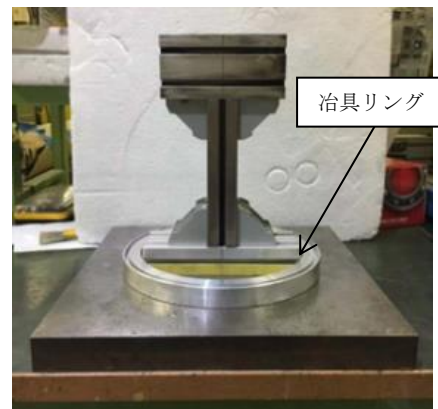


図4 接着用柱型

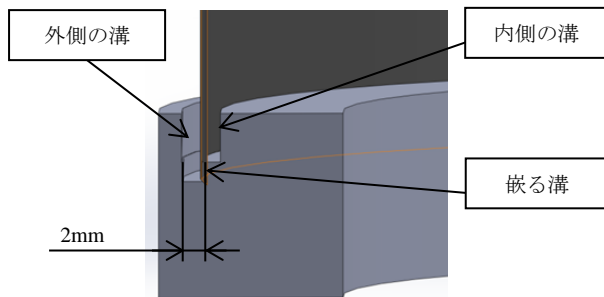


図5 円筒殻を治具リングに嵌る様子

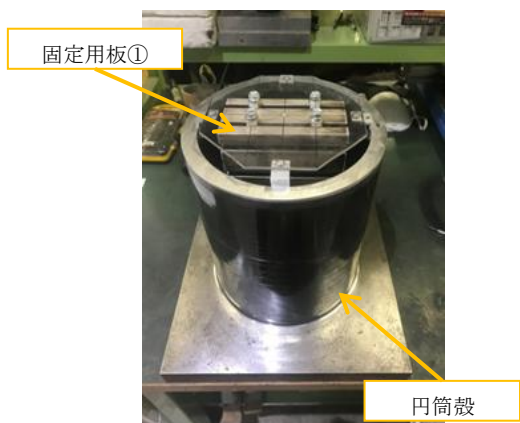


図6 固定用板①

片方の接着の終了後、固定用板②を用いてもう片方の円筒殻を拘束し、接着した(図7)。完成した円筒試験片を図8に示す。

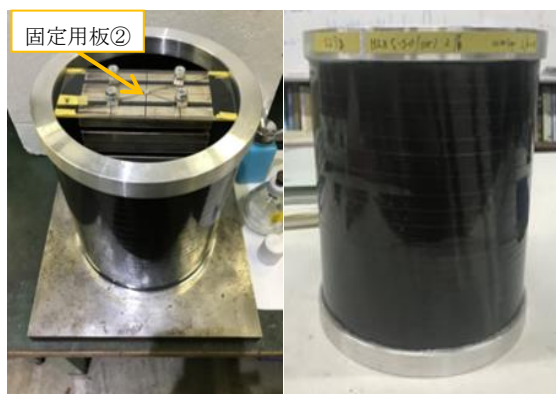


図7 もう片方の接着の様子と固定用板②

図8 円筒試験片

4. 円筒度測定機

2017年度に開発した円筒度測定機を用いて円筒試験片の形状を測定した(図9)。この測定機では、円筒試験片をロータリテーブルに置き、レーザー変位計を用いて6度ごとに一周を測定した。回転方向は合わせて60点(60×6=360°)のデータを取る。一周測定が終わり、レーザー変位計を次の高さに移動し、一周測定する。各高さ位置10点での

表面形状を測定した。

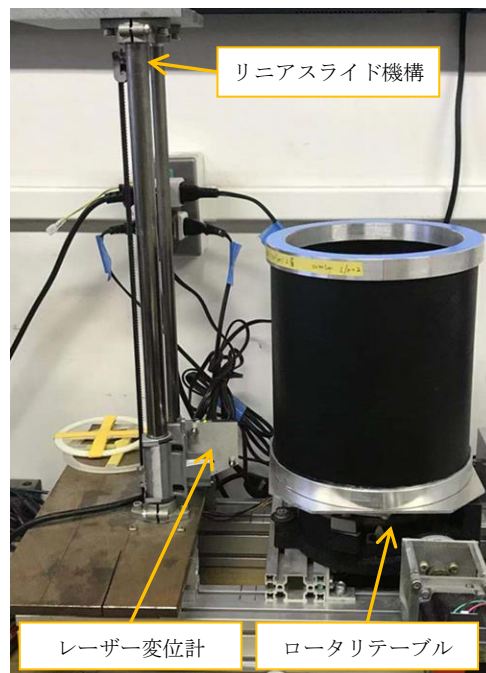


図9 円筒度試験機

5. CFRP 円筒試験片の圧縮座屈実験

5.1 実験目的

本実験の目的は r/t (半径と肉厚の比)は KDF の影響を調べるため、CFRP 薄肉円筒の圧縮座屈実験を行った。また、円筒試験片を4方向に $\delta(\delta/t=7.3$ or $14.6, t=0.112\text{mm})$ だけオフセットさせ、その方向の形状と座屈強度を調べ、KDFを比較した。

5.2 実験方法

万能試験機(島津製作所製 AG-I シリーズ)を用いて圧縮試験を行った。均一な負荷をさせるために、位置合わせに鉄球と位置決め用治具を使用し、試験片は鉄板を介して荷重を負荷した。圧縮用荷重治具を徐々に下げながら、鉄球の位置が鉄板の穴に対して偏っていないことを確認することで位置合わせを行った。具体的には物差しで鉄球を4方向に突きながら、鉄球の移動量を測り、どの方向に突かれても移動量が同程度であれば鉄球は鉄板の穴に対して偏っていないと見なした。

位置合わせが完了したら、まず、150Nの荷重を負荷させ、異常がある場合は、上記の位置決めをやり直した。異常がないと確認出来たら、次に座屈が起きるまで荷重させた。このとき、座屈時の変位量の1.1倍の荷重を負荷させ、除荷するまで計測を継続した(図10)。以上の手順に従い、一つの円筒をオフセット無し(1回目)、オフセットあり(0, 90, 180, 270°)、オフセット無し(2, 3回目)の順番で合計6回測定した。

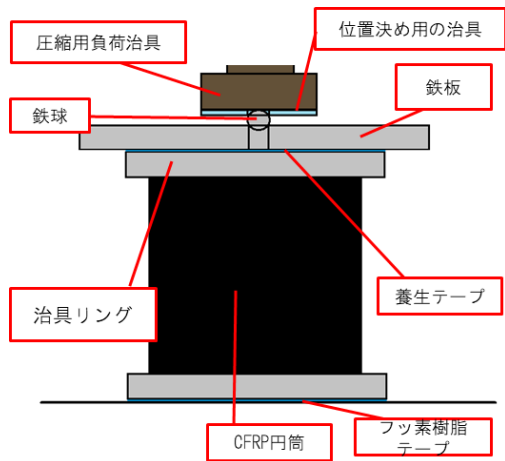


図 10 実験の概要

オフセット無しの場合、中心合わせ治具(図 11)を用いて圧縮座屈実験を行った。一方、オフセットありの場合、オフセット治具(図 12)を用いた。鉄板に偏心量が δ の正方形治具をネジで止めて、オフセット治具を治具リングに嵌めるように鉄板を試験片の治具リングに乗せた。

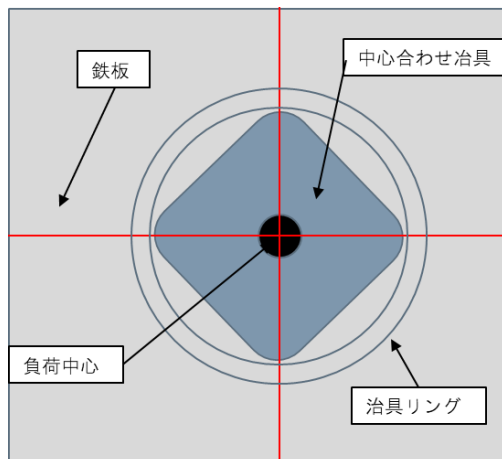


図 11 中心合わせ治具

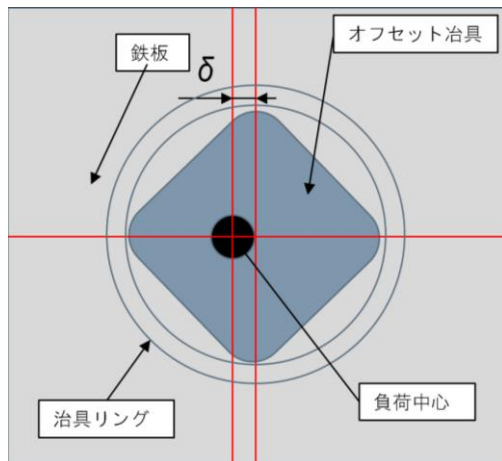


図 12 オフセット治具

また、圧縮試験において、鉄板に異常な傾きがないかどうかを確認するため、上に載せている鉄板の 4 か所にレーザー変位計を配置した(図 13)。圧縮試験の様子を図 14 に示す。

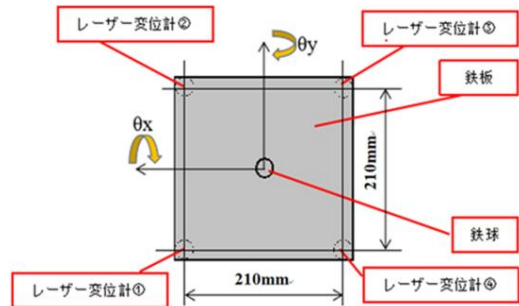


図 13 レーザー変位計の配置図

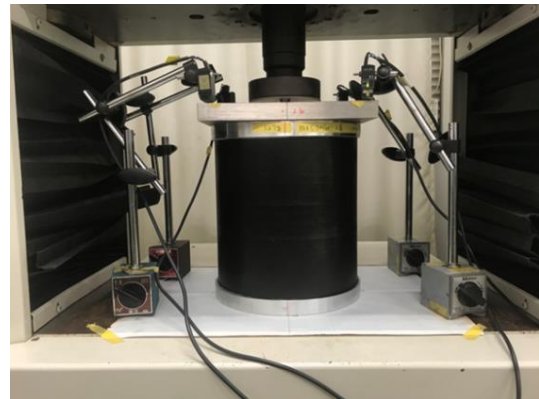


図 14 圧縮座屈実験の様子

6. 結果まとめ及び評価

円筒試験片の圧縮座屈実験前後を測定した結果と実験結果をまとめた。

図 15, 16 に $\delta/t=14.6$ および $\delta/t=7.3$ の時の座屈荷重を示す。同図に示すように意図的に荷重軸と円筒軸をずらすことで 2018 年の研究^[6]と同じく座屈強度に変化が見られた。

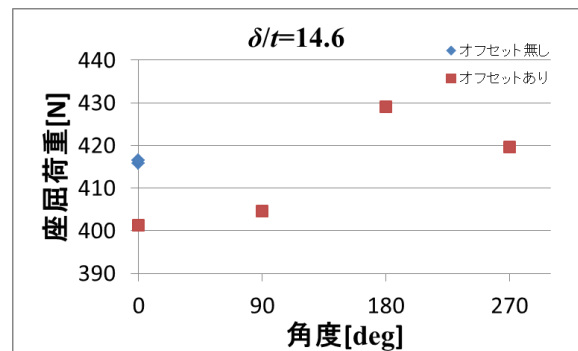


図 15 座屈荷重($\delta/t=14.6$)

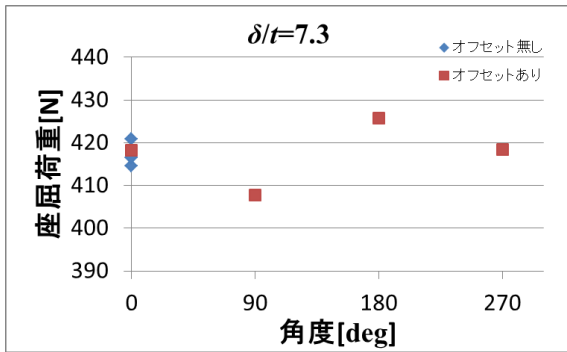


図 16 座屈荷重($\delta/t=7.3$)

円筒度測定機を用いて圧縮座屈実験前の円筒試験片の形状測定結果を図 17 に示す，試験後の形状測定結果（偏心量 $\delta/t=0$ ）を図 18 に示す．また，オフセット偏心量 $\delta/t=14.6$ および 7.3 の場合の計測結果を図 19, 20 に示す．なお，図中の数値は各方向の座屈強度である（赤：最大，青：最小）．同図より，オフセット距離によって，座屈強度が最小になる箇所は 90° から 0° 方向に変わっており，座屈強度はオフセット方向と形状不整だけでなく，オフセット量にも関係することが判明した．

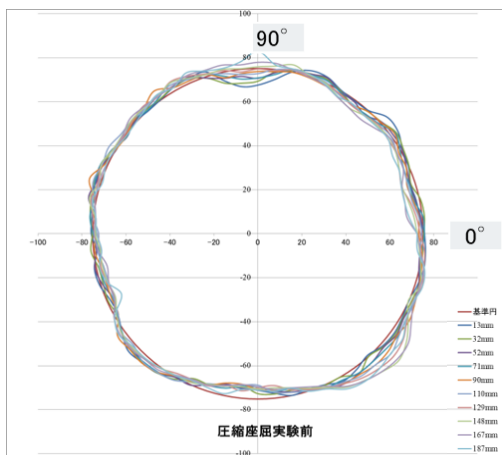


図 17 圧縮座屈試験試験前の形状

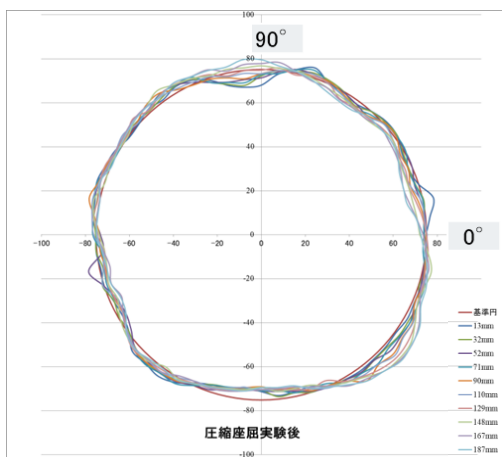


図 18 圧縮座屈試験後の形状(偏心量 $\delta/t=0$)

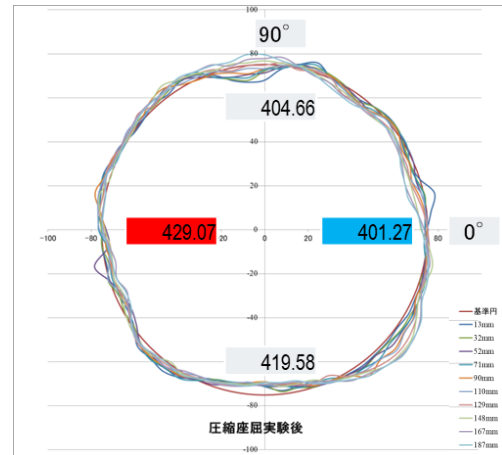


図 19 圧縮座屈試験後の形状(偏心量 $\delta/t=14.6$)

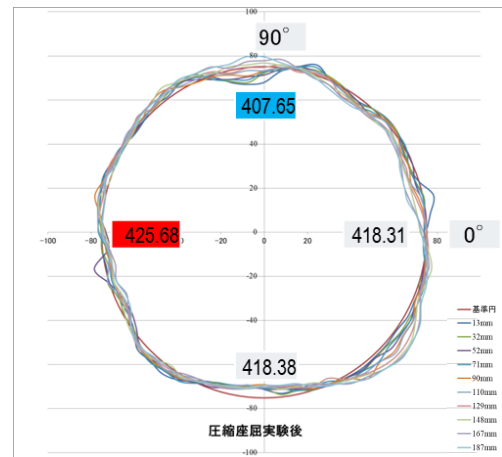


図 20 圧縮座屈試験後の形状(偏心量 $\delta/t=7.3$)

今回の試験及び当研究室の過去の試験^{[3][6]}で得られた KDF- r/t の関係を図 21 に示す．同図より r/t の増加に伴い，KDF の若干の低下が見られたが，回帰分析を行ったところ P 値は 36% で 5% 以上となったため，統計的に有意な結果ではなかった．

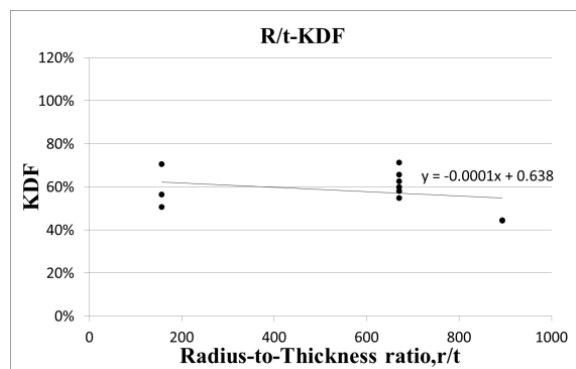


図 21 r/t -KDF 線図

また，図 21 に公表されている過去の実験データ^[5]を加えると，図 22 のようになる．このデータに回帰分析を行ったところ，P 値は 0.01% で，5% 以下となったため，統計的に高度に有意な結果にな

った。しかし、今回の $r/t=893$ の円筒試験片は一つだけで、得られたデータはまだ不十分であるといえる。

形状不整による座屈強度に対する影響」, JAXA, 第34回宇宙構造・材料シンポジウム,2018

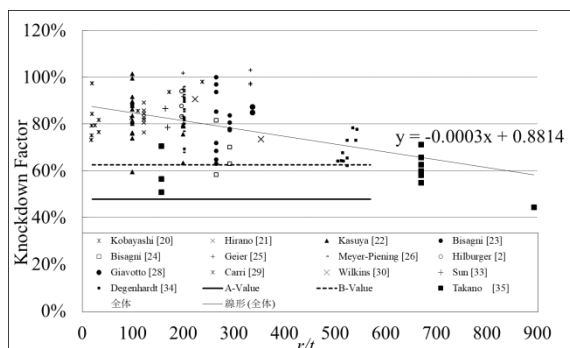


図 22 r/t -KDF 線図 (Takano ら^[5]の結果と統合)

7. 結論

金属円筒の r/t -KDF は右肩下がり傾向を示すが、複合材料はそのような傾向を示さず、 r/t の大きい範囲のデータもなかった。そこで、 $r/t=893$ の CFRP 薄肉円筒試験片を製作し、圧縮座屈実験を行った。さらに、圧縮座屈実験前後で円筒試験片の形状を測定し、KDF との関係性を調査した。

円筒試験片を 4 方向にオフセットして、圧縮座屈実験を行ったところ、KDF はオフセット方向と形状不整だけではなく、オフセット量にも影響することが判明した。

また、 r/t の増加に伴い、KDF の若干の低下が見られたが、回帰分析による P 値は 36% となり、統計的に有意な結果は得られなかった。さらに、公表されている過去の実験データを加えて回帰分析を行ったところ、P 値は 0.01% で 5% 以下となったため、統計的に有意な結果になった。しかし、今回の試験片は一つだけで、得られたデータはまだ不十分であり、その傾向がまだ不明瞭で、更なるデータの蓄積が必要だと考えられる。

参考文献

- [1] Hilburger, M. ,W. , Nemeth ,M. ,P. And Starnes ,J.H., Jr.: Shell Buckling Design Criteria Based on Manufacturing Imperfection Signatures, AIAA J., 37, 2 (1999), pp. 276-278.
- [2] Atsushi Takano : Buckling Test Composite Cylindrical Shells With Oval Imperfection Under Axial Compression , ECSSMET 2018, The Netherlands
- [3] 包景軒, 高野敦, 「1B09 CFRP 薄肉円筒の形状不整による座屈強度に対する影響」, 日本航空宇宙学会, 第 61 回構造強度に関する講演会, 2019
- [4] Ronald Heinz Norbert Wagner, S. Niemann, Christian Hühne , Regina Khakimova, Robust design criterion for axially loaded cylindrical shells – Simulation and Validation , 2017
- [5] Atsushi Takano, Statistical Knockdown Factors of Buckling Anisotropic Cylinders Under Axial Compression, Journal of Applied Mechanics, 2012, Vol. 79 / 051004-1
- [6] 陳澤宇, 包景軒, 高野敦, 「CFRP 薄肉円筒の