

CFRP 薄肉円筒の形状不整による座屈強度に対する影響

陳 澤宇(神奈川大・学), 包 景軒(神奈川大・学), 高野敦(神奈川大)
Takuu Chin, Jingxuan Bao, Atushi Takano (Kanagawa University)

1. 研究背景

薄肉円筒において、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るとは言い難い。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り^[1]、結果は解析に対して5~10%低い結果を示しているが、この解析方法は事前に円筒を製造してその形状不整を測定している必要があるため、製造前の予測には適用出来ず設計には向かない。

当研究室の従来の研究では、積層重なりギャップ、半径と肉厚の比、長さ半径の比、CFRPの種類に着目したが、回帰分析の結果、有意ではなかった。また、昨年は新開発の円筒測定機を用いて、形状不整に着目し、意図的に楕円型CFRP円筒試験片を作成し、座屈試験を行った。回帰分析の結果、楕円成分の大きさと座屈荷重は対応する結果とならなかったが、形状不整要素の w_6 と w_9 (6次及び9次の波数成分)には感度が見られた^[2]。

また、円筒試験片を0度、90度、180度、270度の4方向に一定距離 オフセットした圧縮試験を行い、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]。しかし、この研究は実験した試験片は一つだけで、得られたデータはまだ不十分であった。

2. 研究目的

そこで、真円度測定機を用いて形状不整要素を取り込んで圧縮座屈試験を行うことで、薄肉円筒座屈強度のばらつきの原因を追究し、解明する。

更に、文献^[2]に引き続き、円筒試験片を0度、90度、180度、270度の4方向に一定距離 オフセットした圧縮試験を行い、試験片のオフセットとその方向の形状特性の関係が、ノックダウンファクタ(=実験値/理論値)にどんな影響を与えるかを調べる。

3. 円筒度測定機

試験片の形状の測定は、去年開発した円筒度測定機を用いて測定する。図1に円筒度測定機を示す。

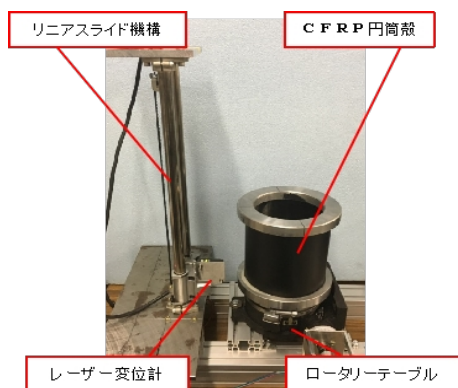


図1 円筒度試験機

この測定機の仕組みは、測定する試験片をロータリーテーブルに置き、6度ごとに一周を測定する。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、レーザー変位計が次の高さに移動し、一周測定する。各高さ位置10点での表面形状を測定する。

測定したデータは式(1)を用いて各断面で離散フーリエ

変換して、直径のふくらみ w_0 、剛体移動 w_1 、楕円成分 w_2, \dots に分解する。

$$w(\theta) = w_0 + w_{1i} \sin \theta + w_{1r} \cos \theta + w_{2i} \sin 2\theta + w_{2r} \cos 2\theta + \dots + w_{ni} \sin n\theta + w_{nr} \cos n\theta \dots \dots \dots (1)$$

4. オフセットを許した圧縮実験

4.1 実験概要

1. 以前に制作した、まだ形状測定していない試験片の形状を測定し、圧縮試験を行う。
2. 測定した円筒殻を試験することで、各形状不整要素のノックダウンファクタへの影響を調べる。
3. さらに円筒試験片を4方向にオフセットし、その方向の形状と座屈強度を調べ、ノックダウンファクタを比較する。

4.2 試験片のパラメーター

板厚が薄い円筒であれば、座屈しても繊維が破断しないので、繰り返し座屈が可能と判断し2016年以前に制作した試験片に貼ってあるひずみゲージを剥がし、今年の圧縮試験に再利用した。使用した試験片を表1、試験片の製作に使用したプリプレグを表2に示す。

表1. 使用した試験片

NO.	Specimen	Layup sequence	Thickness	Ply gap or overlap
12	HSX 2ply L/r=2	(-50/50)	0.116	overlap
14	HSX 2ply L/r=2	(-50/50)	0.116	Gap
15	TR 2ply L/r=2	(-50/50)	0.163	Gap
16	TR 2ply L/r=2	(-50/50)	0.163	overlap
20	TR 2ply L/r=2	(-50/50)	0.163	overlap

表2. 使用したプリプレグのパラメーター

型番	厚さ[mm]	ヤング率(繊維方向) [Gpa]	樹脂含有量
HSX350C075S	0.0582	260.3	25%
TR350J075S	0.081	113.7	37%

4.3 試験方法

万能試験機を用いて圧縮試験を行う。均一な荷重をさせるために、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を合わせる。確認の方法は物差しで鉄球を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一致であれば鉄球は鉄板の穴に対して偏っていないことが確認できる。

位置合わせが完了したら、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す。異常がないと確認出来たら次に座屈が起きるまで荷重をかける。座屈時の変位量の1.1倍の荷重を負荷、除荷するまで計測する(図2)。以上の手順に従い、一個の円筒をオフセット無し、0°、90°、180°、270°、オフセット無し(二回目)の順番で5回測定する。

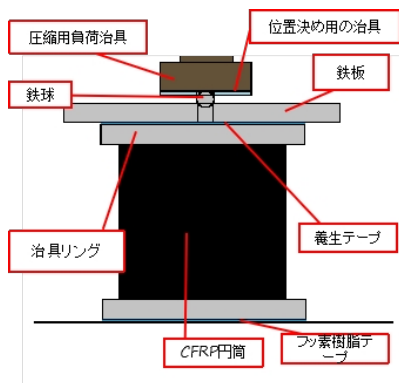


図 2 試験の概要

オフセットを実現するために、オフセット治具を使うこととした。鉄板に偏心量が n 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る。オフセットは TR 型円筒殻の厚さの 10 倍 (1.63mm) を基準とした。オフセットなしの場合は中心合わせ治具 (図 3) で、オフセットありの場合はオフセット治具 (図 4) で試験をした。

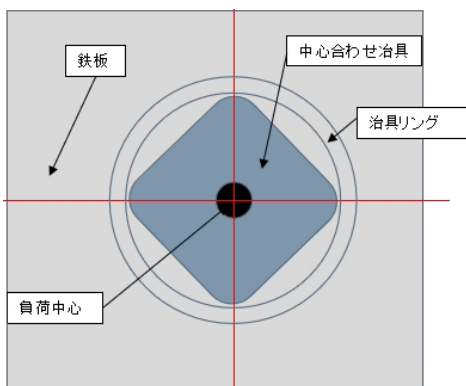


図 3 中心合わせ治具

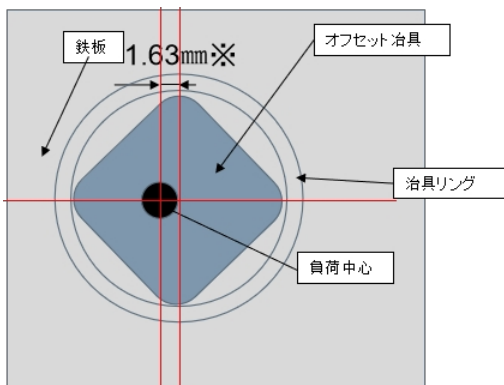


図 4 オフセット治具

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。配置されたレーザー変位計の位置を図 5 に示す。圧縮試験の様子を図 6 に示す。

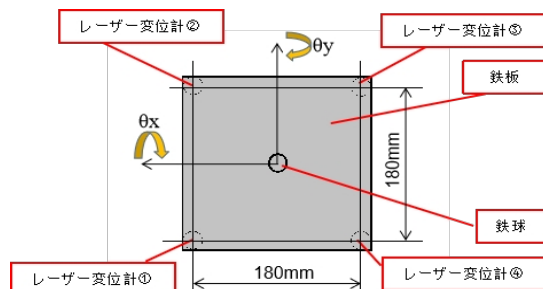


図 5 レーザー変位計の位置

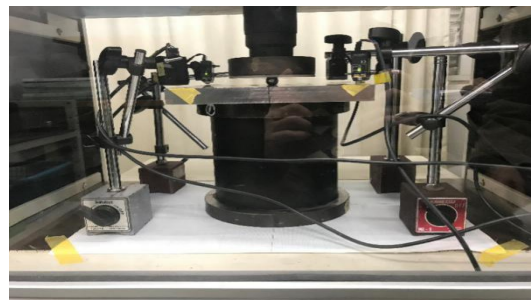


図 6 圧縮試験の様子

4.4 結果のまとめ及び評価

結果を以下のようにまとめた。横軸をオフセットの方向、縦軸を座屈発生時の荷重とする。図 7～図 11 を比較すると、意図的に荷重軸と円筒軸 1.63mm 程度ずらして実験した結果、座屈強度の変化が見られた。

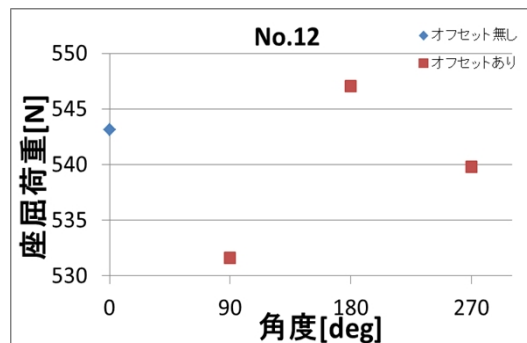


図 7 No.12 試験結果

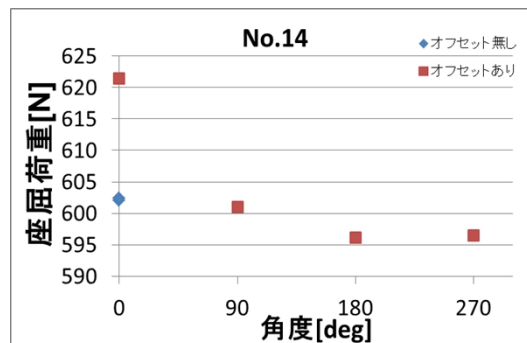


図 8 No.14 試験結果

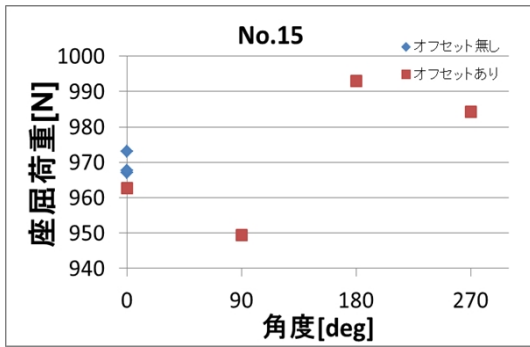


図 9 No.15 試験結果

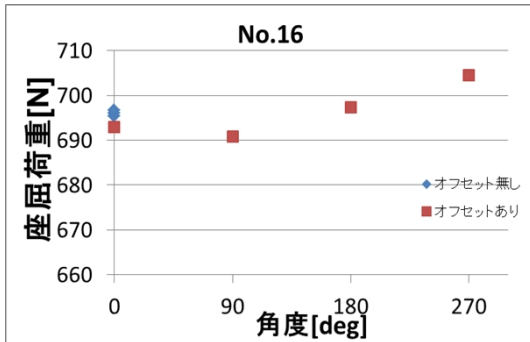


図 10 No.16 試験結果

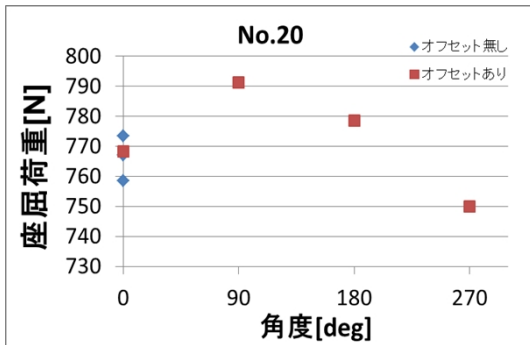


図 11 No.20 試験結果

4.5 結果のまとめ及び評価(その2)

圧縮試験前に各試験片の形状を3で述べた円筒測定器を使用し、形状測定を行った。さらに、測定した各試験片の形状に、各方向の座屈強度をプロットした。測定した形状及び各方向の座屈強度を図4.5.1~4.5.5に示す。赤く塗りつぶされるのが最大値で、青く塗りつぶされるのが最小値である。

この W_{rms} は形状不整要素の振幅を意味し、形状不整の程度を表す係数であり、 W_{rms} が大きいものの形状が最も乱れていると言える。したがって絵、この五つの結果から、No.12の形状が一番乱れていることがわかる。 w_{rms} は以下の式によって求めた。

$$W_{rms} = \sqrt{\frac{1}{10} \times \sum_{n=2}^9 W_n^2} \quad (2)$$

オフセットの方向とその方向の形状から、図16のような最も形状が整っているところの座屈荷重が一番大きいものがあり、図13のようにそうでないものもあった。

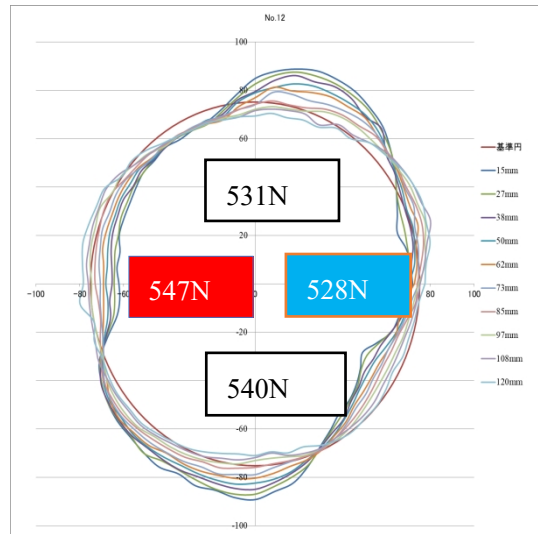


図 12 No.12 $W_{rms}=0.100$

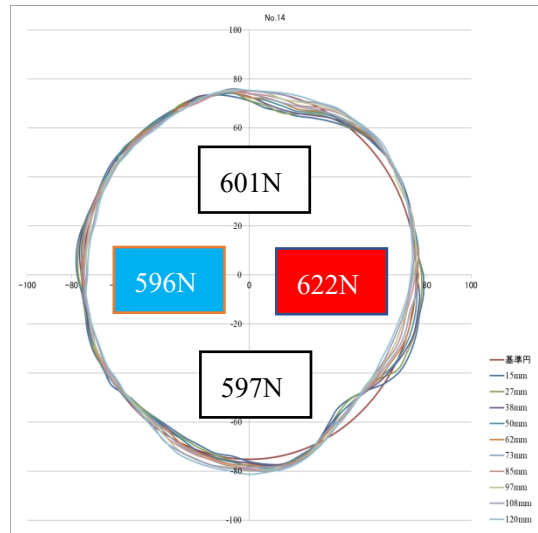


図 13 No.14 $W_{rms}=0.041$

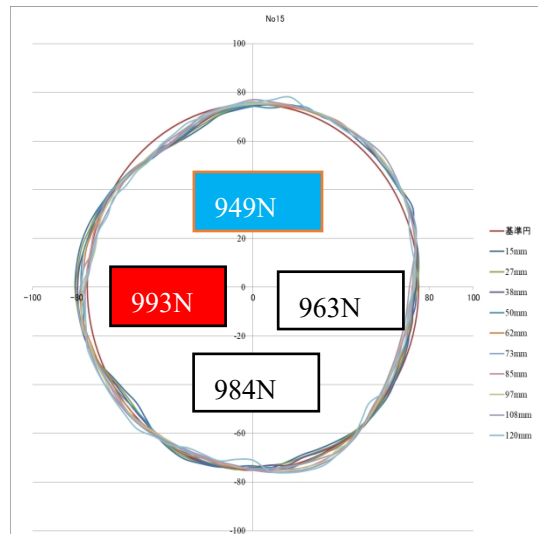


図 14 No.15 $W_{rms}=0.039$

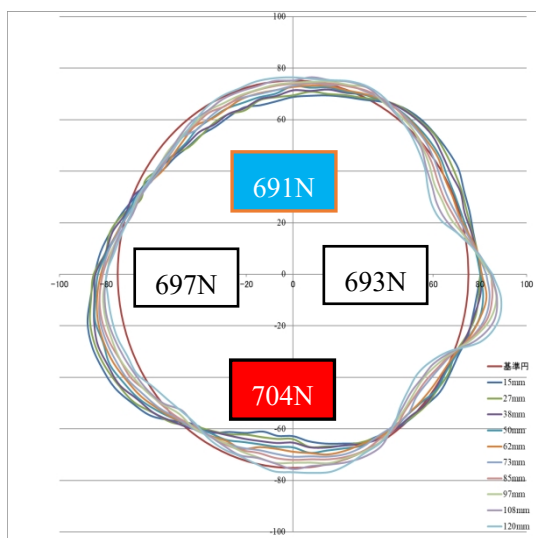


図 15 No.16 $W_{rms}=0.082$

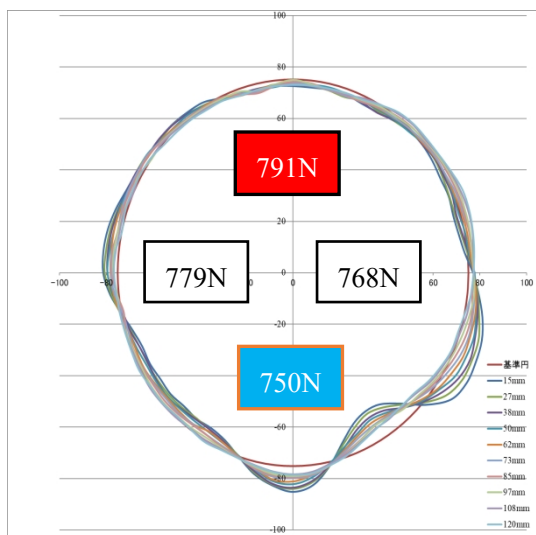


図 16 No.20 $W_{rms}=0.052$

以上から、座屈強度についてオフセット方向と形状不整とは単純な相関関係ではない可能性があると考えられる。

4.6 結果のまとめ及び評価(その3)

各断面で離散フーリエ変換して、直径のふくらみ w_0 、剛体移動 w_1 、楕円成分 w_2 、...などに分解し、その中の2次～9次波数の成分を横軸に、ノックダウンファクタを縦軸にしたグラフを図 17 から図 24 に示す。

$w_2 \sim w_4, w_6 \sim w_9$ がノックダウンファクタと単純な線形関係にならなかったが、 w_5 とノックダウンファクタは相関が見られた。

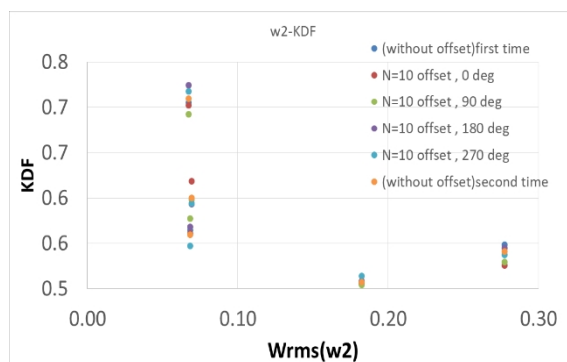


図 17 w_2 -KDF 線図

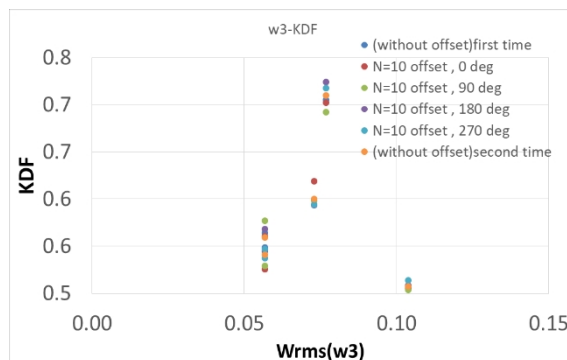


図 18 w_3 -KDF 線図

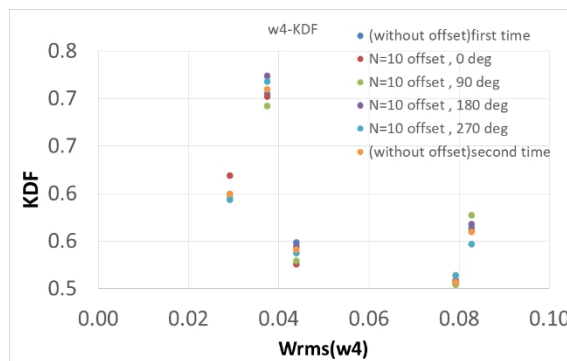


図 19 w_4 -KDF 線図

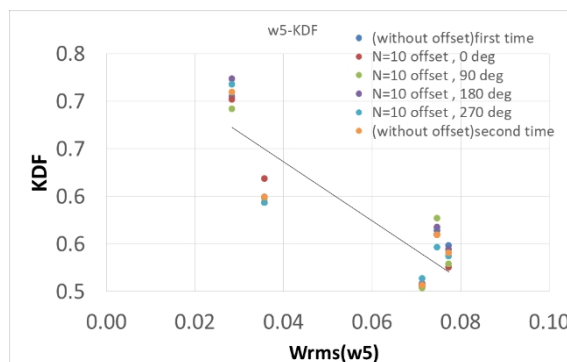


図 20 w_5 -KDF 線図

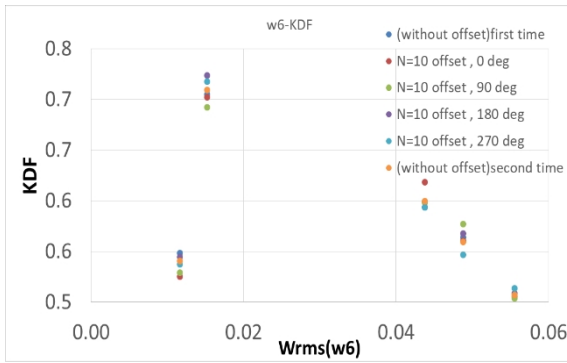


図 21 w_6 -KDF 線図

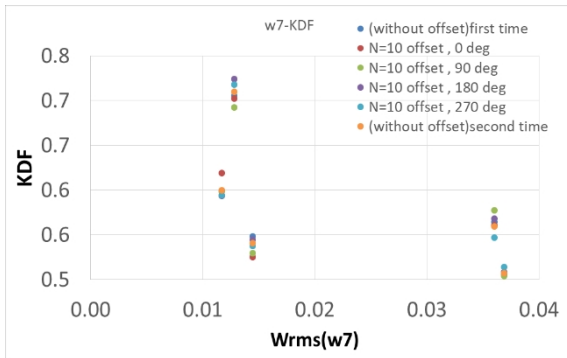


図 22 w_7 -KDF 線図

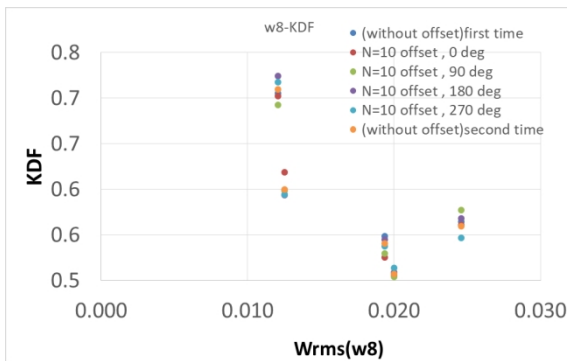


図 23 w_8 -KDF 線図

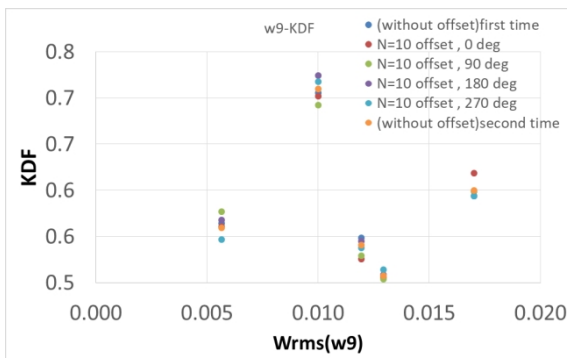


図 24 w_9 -KDF 線図

昨年度の試験結果により、ノックダウンファクタが w_6 と w_9 に感度があった。円筒の形状不整を離散フーリエ変換し w_2 から w_9 までの要素に分解した結果、昨年度の実験結果に反して、 w_6 と w_9 には感度が見られなかったが、 w_5 に

は感度が見られた。

また、形状不整の振幅 w_{rms} ($w_2 \sim w_9$ の rms) を横軸、ノックダウンファクタを縦軸にしたグラフを図 25 に示す。

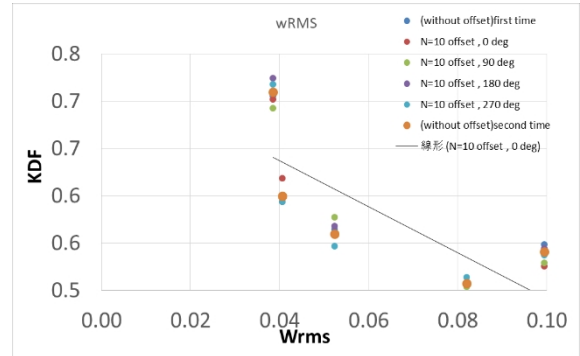


図 25 w_{rms} -KDF 線図

w_{rms} から見ると、 w_{rms} が大きいほど、座屈強度が低下していくことが見えた。すなわち、円筒の形状が乱れるほど、座屈強度が低下する。

5. 結言

円筒試験片を4方向にオフセットし、その方向の形状と座屈強度を調べ、比較した結果、その傾向がまだ不明瞭であった。更なるデータの蓄積が必要だと考えられる。

一方で、 w_{rms} が大きいほど、座屈強度が低下する傾向が見られた。すなわち、円筒の形状が乱れるほど、座屈の強度が低下する。ノックダウンファクタが、 w_6 と w_9 には感度が見られず、 w_5 に感度が見られた。データの蓄積によって、それらの関係が見えてくると考えられる。

6. 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