

複合材料からなる円筒シェルの終局挙動に関する実験及び解析的研究

古賀掲維*・東哲平**・鬼塚友章***・山口浩平****・松田浩****

Experimental and Analytical Study on the Ultimate Behavior of Composite Cylindrical Shells

by

Aoi KOGA*, Teppei AZUMA**, Tomoaki ONIZUKA***, Kohei YAMAGUCHI****
and Hiroshi MATSUDA****

Thin cylindrical shell structure has initial shape imperfections, and the ultimate behavior of thin cylindrical shells is affected by these imperfections. To simulate the ultimate behavior of thin cylindrical shells we should consider a thorough analysis. However, it is not realistic to analyze each individual thin cylindrical shell. In this study, a statistical model of the initial shape imperfection based on a statistical property of the initial shape imperfection is shown. In addition, a statistical method to evaluate the ultimate behavior is shown using Monte Carlo simulation.

Key words: Statistical Method, Thin Cylindrical Shell, Initial Shape Imperfection, Ultimate Behavior

1. 序論

円筒シェルは軽量かつ高剛性であるため、構造軽量化が求められる多くの分野で構造要素として多用されている。例えば、航空・宇宙工学分野においては航空機やロケットの胴体構造として、土木・建築工学分野においては橋脚やタンクなど、多種多様な構造物において用いられている。特に、航空、宇宙構造物では、「軽量で強い」特性を有する CFRP などの異方性材料からなるシェル構造物が主流となっている。

一方、円筒シェル構造部材は、軸圧縮、曲げ、ねじり、せん断あるいは内圧などの作用を受け、それら内一つの作用、または複数の作用によって座屈破壊が生じ得る 1)~4)。これまで、円筒シェルの終局強度を決定するにあたっては、膨大な量の実験を行って安全側の設計が行われてきた。円筒シェルにおける種々の初期不整の中で最も大きな影響を与えるのは円筒形状の不完全性である。形状初期不整については実験及び計測が困難である理由から、面内剛性を低減する剛性低減 (RS: Reduce Stiffness) 法やモンテカルロシミュレーションによる確率的な取扱いによる評価法などが提案されてきた。しかしながら、形状初期不整の影

響が顕著に表れる薄肉円筒シェルでは、未だ解析的に終局強度の定量的評価が明確に成されていない。

本研究では、アルミニウム製の等方性薄肉円筒シェルの軸圧縮試験を実施し、形状初期不整が円筒シェルに及ぼす影響について実験及び解析的に検討し、薄肉円筒シェルの終局強度における統計的強度評価法を提示した。また、複合材料からなる異方性円筒シェルの軸圧縮試験及び有限要素解析を実施し、複合材料円筒シェルの終局強度及び座屈モードについて検討した。

2. 形状初期不整計測

2.1 デジタル画像相関法 (DICM) の概要

DICM は、測定対象物表面の模様ランダム性を基にして、変形前後の測定対象物表面を CCD カメラなどで撮影したデジタル画像を画像処理することにより、計測範囲全体にわたって変形の大きさと方向を求めることができる計測手法である。

2.2 形状初期不整の計測方法

平成 30 年 6 月 20 日受理

* 長崎大学 ICT 基盤センター (Center for Information and Communication Technology)

** 長崎大学大学院博士前期課程総合工学専攻 (Department of Advanced Engineering)

*** (株)オリエンタルコンサルタンツ (前長崎大学大学院博士前期課程学生) (Oriental Consultants Co., Ltd.)

**** 長崎大学大学院工学研究科 (Division of System Science)

Photo 1 は計測のためにランダムパターンを吹き付けた円筒シェル試験体である。続いて、DICMを用いて計測を行うが、円筒シェルのような試験体を計測する場合、一度の計測でデータを取得することは困難であるため、試験体を 30° 毎に回転させ計 12 回の計測を行い、直交直線座標系のデータを取得した。

薄肉円筒シェル試験体の初期不整分布状況を調べるため、3 体の試験体について DICM による計測を行った。試験体表面のランダムパターンは DICM 計測のためのものである。本研究では、DICM による計測で得られた中心からの距離 R^* と半径 R の差を初期不整 (dR) として算出した。Fig. 1 は、計測した 3 体のうち 1 体の初期不整の分布状況である。

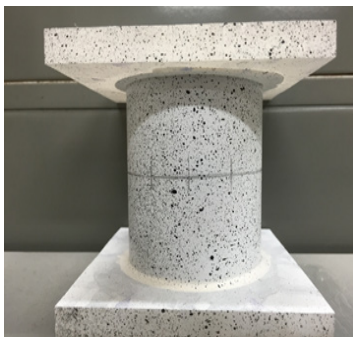


Photo 1 試験体

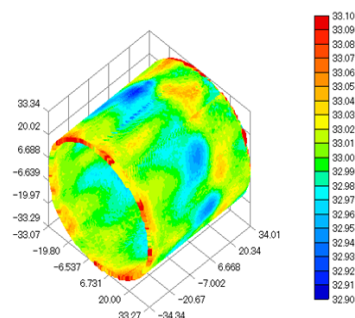


Fig. 1 形状初期不整結果

2.3 初期不整分布モデル

Fig. 2 は、DICM による計測により得られた合計約 210 万個の初期不整データについて度数分布図を作成したものである。Fig. 2 の分布に対して、Q-Q プロット図及び shapiro-wilk 検定による正規性の検定を行ったところ、有意水準 0.05 に対して P 値が 0.07~0.1 の間に収まったことから、Fig. 2 はほぼ正規分布に従う分布であると言える。Fig. 3 に Q-Q プロット図による検定結果を示す。本研究では、Fig. 2 の分布に基づく正規分布を用いて解析に用いる初期不整分布モデルを作成した。

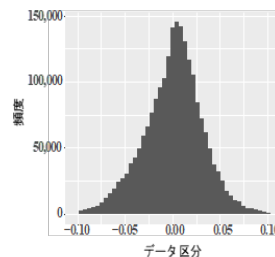


Fig. 2 正規分布曲線

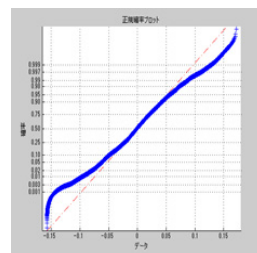


Fig. 3 Q-Q プロット図

3. 等方性薄肉円筒シェルの座屈実験

本章では、等方性薄肉円筒シェルの終局挙動を把握するために行った座屈実験について述べる。

3.1 試験体の概要

実験で用いた試験体は、半径 $R=33.0\text{mm}$ 、平均板厚 $H=0.194\text{mm}$ 、高さ $L=66.0\text{mm}$ 、径厚比 $R/H=208$ のビール缶用の材料から作成したアルミニウム製の薄肉円筒シェルである。上下端固定とし、かつ、均一に載荷するため、薄肉円筒シェルをアクリル製の固定板にはめ込み、内側と外側から高強度石こうを流し込んで試験体を作成した。Fig. 4 は試験体の概要図である。

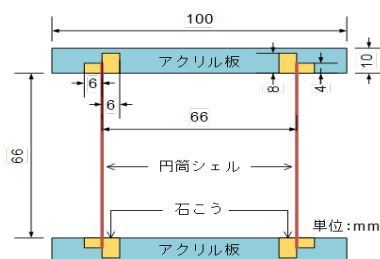


Fig. 4 試験体概要

3.2 載荷試験の概要

載荷試験では、試験機として(株)島津製作所製「10kN 万能試験機」を使用した。載荷は変位制御とし、上端側から軸方向変位を 0.04mm/min の速度で載荷した。

3.3 座屈形状の計測

座屈後に載荷を停止し、形状初期不整の計測と同じく DICM を用いて座屈形状の計測を行った。

4. 等方性薄肉円筒シェルの非線形有限要素解析

統計的手法を用いた評価を行うためには、シミュレーションに用いる解析手法の精度が重要となる。本章では本研究で行った非線形有限要素解析について詳述するとともに、実験結果との比較を行い、解析手法の精度について検討する。

4.1 解析モデルの概要

本研究では、形状初期不整のない円筒シェルとして作成した有限要素モデルの各節点において、DICMの計測データに基づく形状初期不整を与えるという手法で解析モデルを作成した。有限要素モデルに形状初期不整を与える際には、1試験体当たり約70万点ある形状初期不整のデータについて、節点を中心とする一定の範囲について平均を算出し、節点の形状初期不整値として与えた。

解析モデルの寸法は、半径 $R=33.0\text{mm}$ 、高さ $L=66.0\text{mm}$ である。要素分割数は、各要素が正方形に近い形となるように、軸方向に60、円周方向に200とした。また、今回解析対象とした試験体では、軸方向で板厚が異なっていたため、マイクロメーターを用いて9カ所で板厚を測定し、測定値を要素の厚さとして用いた。

材料特性は、薄肉円筒シェルから切り出した試験片の引張試験を行い、試験から求めた応力-ひずみ関係から構成則を作成して用いた。Fig. 5 は作成した構成則である。ヤング率は 91.1GPa 、ポアソン比は 0.33 である。Fig. 6 は作成した解析モデルである。

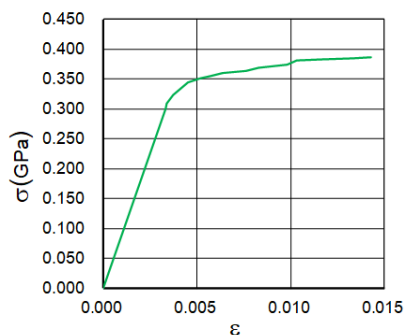


Fig. 5 構成則

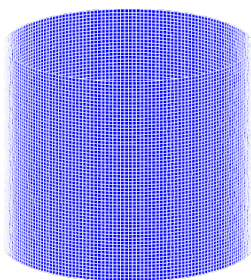


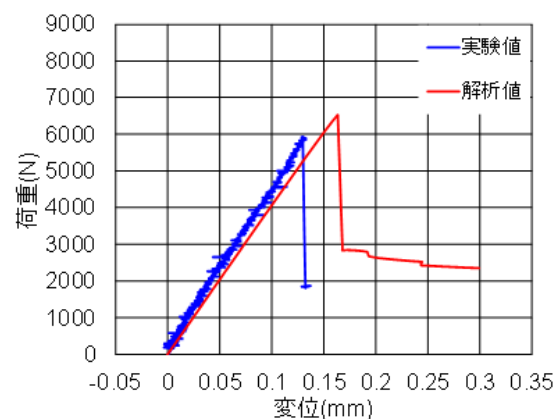
Fig. 6 解析モデル

4.2 解析概要

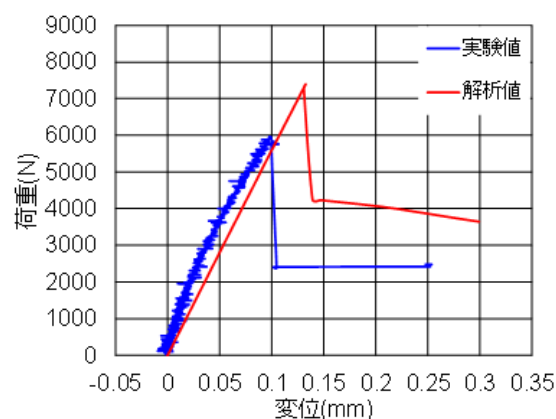
解析には、汎用非線形有限要素解析プログラム MARC を用いた。境界条件は上下端を固定とし、上端から下向きの強制変位を与えた。

4.3 解析結果

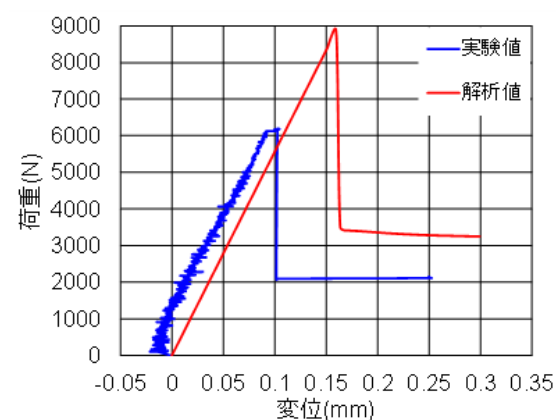
解析結果を Fig. 7, Fig. 8 に示す。



(a) 試験体 No. 1

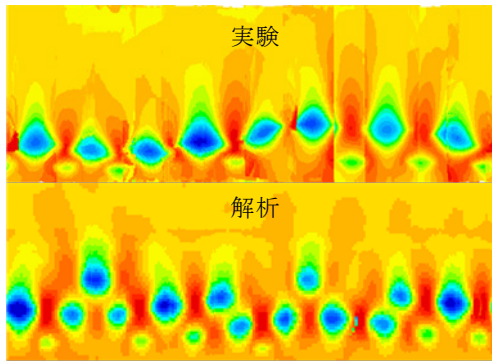


(b) 試験体 No. 2

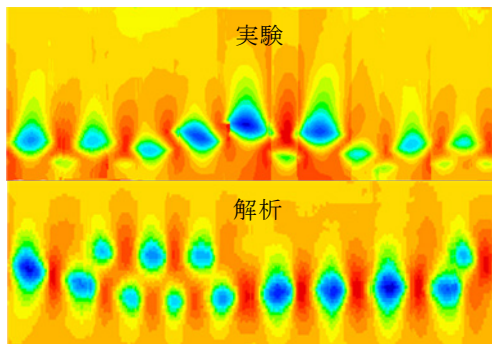


(c) 試験体 No. 3

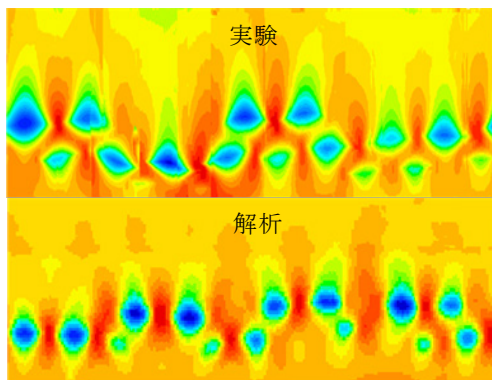
Fig. 7 荷重-変位曲線



(a) 試験体 No. 1



(b) 試験体 No. 2



(c) 試験体 No. 3

Fig. 8 座屈形状

Fig. 7を見ると、試験体 No. 1 で解析結果と実験結果の座屈荷重がほぼ一致していることがわかる。また、Fig. 8を見ると、解析結果の座屈形状でもダイヤモンドバックリングを再現できていることが確認できる。なお、全ての試験体について、面外変形のピーク値の下端からの位置が解析結果および実験結果でほぼ一致していた。

以上の結果から、本研究で用いた解析手法は形状初期不整を有する薄肉シェルの終局挙動をほぼシミュレートできると判断した。

5. 統計的評価手法

薄肉円筒シェルの終局挙動は形状初期不整によって

大きく左右される。しかしながら、形状初期不整分布は試験体ごとに異なる。それぞれの試験体について形状初期不整データを計測し、形状初期不整データを考慮した有限要素モデル作成して非線形有限要素解析を行えば終局挙動をシミュレート可能であるが、個々の試験体について同様の解析を行うのは現実的ではない。

本章では、統計的手法を用いて、形状初期不整を有する薄肉円筒シェルの終局挙動を評価する手法について詳述する。

5.1 評価手法の概要

有限要素モデルの各節点において形状初期不整分布モデルに従う乱数を発生させ、解析モデルを作成した。乱数は発生させる度に異なる値となるため、作成した解析モデルは、常に異なった形状初期不整分布を持つモデルとなる。この異なる形状初期不整分布を持つモデルを複数作成し、非線形有限要素解析することによって、形状初期不整を有する薄肉円筒シェルの終局挙動を評価する。今回は、径圧比 $R/H=50, 100, 200, 400$ のパラメータについて 150 体ずつ解析を行った。

5.2 終局荷重応答値

Fig. 9 は径厚比 $R/H=200$ の場合について、形状初期不整がない解析モデルと乱数により形状初期不整を与えた解析モデルの終局挙動を比較したグラフである。不整あり 1、不整あり 2 のグラフは、150 体の解析結果からランダムに取り出したものである。Fig. 9 より形状初期不整を有するモデルは形状初期不整がないモデルと比較して終局荷重が大幅に低下していることがわかる。Fig. 10 は同じく径厚比 $R/H=200$ の場合について、形状初期不整を与えたモデルの終局荷重を形状初期不整がないモデルの終局荷重で正規化した終局荷重応答値である。Fig. 10 より形状初期不整を有するモデルの終局荷重応答値は、それぞれ一定の範囲に集中していることがわかる。

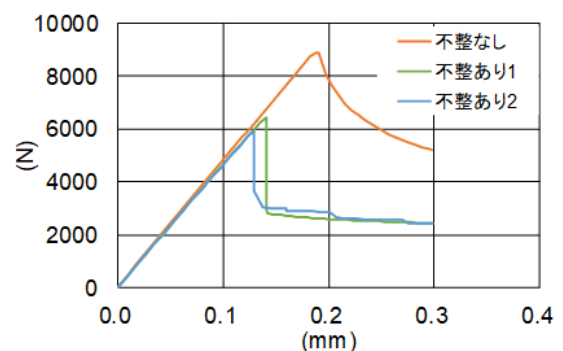


Fig. 9 形状初期不整の有無による終局挙動の比較

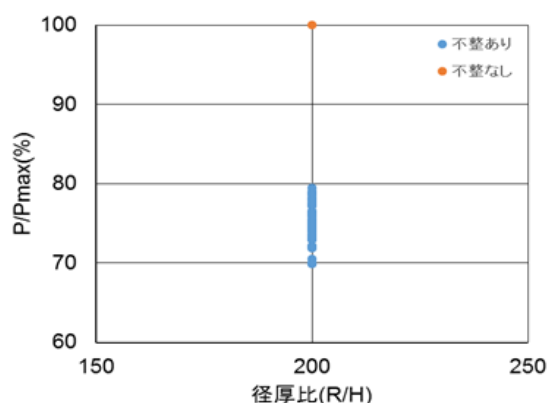


Fig. 10 座屈荷重応答値

Fig. 11 は径厚比 $R/H=200$ の場合について、座屈荷重応答値の度数分布と確率密度関数を求めたものである。また、Fig. 11 の終局荷重応答値に対して正規性の検定を行った。Fig. 12 は終局荷重応答値のデータの Q-Q プロット図である。シャピロウィルク検定の結果は、優位水準 0.05 に対して P 値が 0.098 であった。したがって、終局荷重の応答値は正規分布に従っていると判断した。このことから正規分布に従う形状初期不整分布を有する薄肉円筒シェルの座屈荷重応答値は一定範囲に収まり、その分布も正規分布に従うと考えられる。すなわち、ある程度の解析モデルについて解析を行えば、同様な形状初期不整分布をもつ薄肉円筒シェルの終局挙動を統計的に評価することが可能となる。

Fig. 13 は異なる径厚比 $R/H=50, 100, 150, 200, 300, 400$ のモデルについて座屈荷重応答値を求め、グラフにプロットしたものである。径厚比毎に座屈荷重応答値の分布状況に違いはあるが、概ねある程度の範囲内に収まっていることが確認できる。Fig. 13 の座屈荷重応答値の最小値を結んだ曲線は、形状初期不整を有する薄肉円筒シェルの終局強度曲線となる。

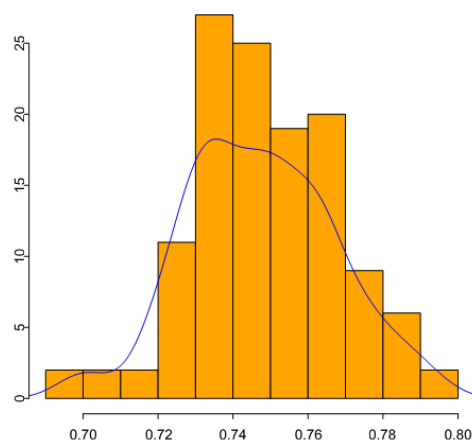


Fig. 11 座屈荷重応答値の度数分布

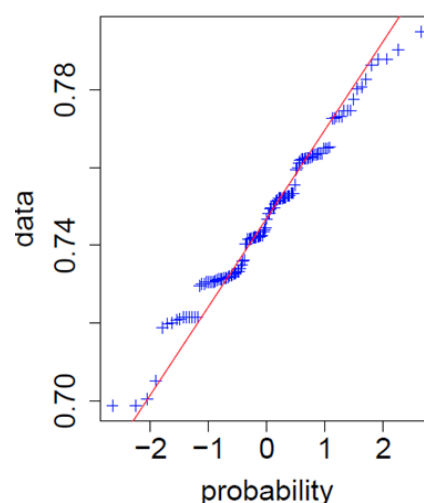


Fig. 12 正規 Q-Q プロット図

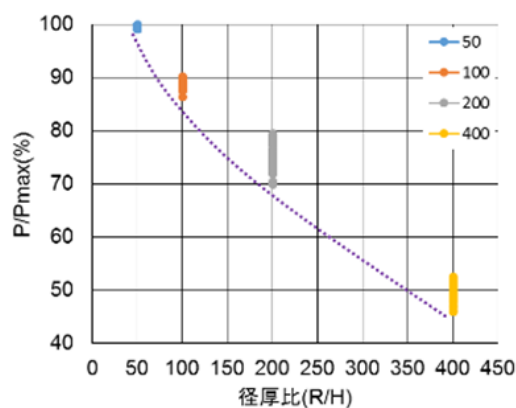


Fig. 13 径圧比毎の座屈荷重応答値

6. 複合材料からなる円筒シェルの軸圧縮試験

6.1 材用特性

本研究で使用した複合材料は、材料：CFRP、仕様：PAN 系 24ton 繊維、マトリクス：125°硬化タイプである。一方向強化板としての材料特性を Table 1 に示す。ここで、EL, ET, EZ 及び FL, FT, FZ は Fig. 14 における各方向成分の弾性係数及び引張強度であり、GLT, GTZ, GZL 及び FLT, FTZ, FZL はそれぞれの平面で考えた場合のせん断弾性係数及びせん断強度である。また、 ν_{ij} はそれぞれの平面に対するポアソン比である。

Table 1 CFRP 材料物性

材料物性	弾性係数(GPa)		ポアソン比		引張強度(MPa)	
	EL	140	ν_{12}	0.32	FL	2200
	ET	9	ν_{21}	0.02	FT	50
	Ez	9	ν_{23}	0.35	Fz	50
	GLT	4.2	ν_{32}	0.35	FLT	110
	GTZ	3.4	ν_{13}	0.32	FTZ	18.5
	GZL	4.2	ν_{31}	0.02	FZL	110

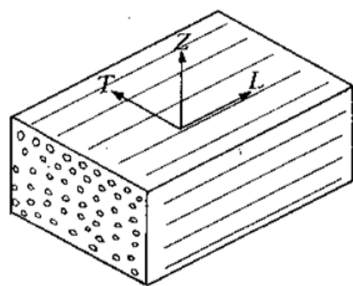


Fig. 14 一方向強化板

6.2 材料試験の概要

本研究では、繊維、マトリクスそれぞれの構成則を実験で確かめることができなかったため、ダンベル引張試験により積層板全体としての構成則を取得し、Table.1 の材料特性を用いた解析モデルの結果と比較している 5)～7)。ダンベル試験片の寸法は、板厚 $t=10\text{mm}$ 、幅 $b=10\text{mm}$ である。

6.3 材料試験結果

材料試験結果及び Marc/Mentat によるダンベル試験片モデルの解析結果を Fig. 15 に示す。解析の際には Table 1 に示す構成則を用いることとした。実験結果と解析結果を比較すると、引張強度において解析結果の方が約 20%高い値となった。

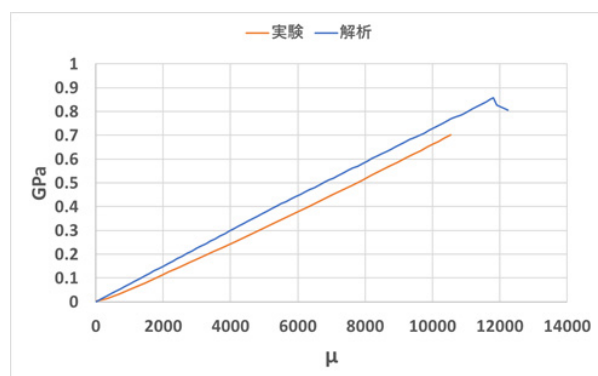


Fig. 15 ダンベル試験結果

6.4 軸圧縮試験の概要

本実験では、径厚比の変化による終局挙動の変動に加え、高さの変化による終局挙動の変動に対しての評価を行うため、A1～D3 の 12 体の試験体を用意した。試験体 A1～D3 の幾何学パラメータを Table 2 に示す。また、代表的な写真として、A1 試験体を Photo 2 に示す。積層数は、板厚 $t=2\text{mm}$: 8ply, $t=1\text{mm}$: 4ply, $t=0.5\text{mm}$: 2ply であり、板厚 $t=0.25\text{mm}$ の一方向強化板を $0/90^\circ$ に交互に張り合わせてある。径厚比については、A1～B3 は比較的厚肉であり、C1～D3 は比較的薄肉である。

試験体に対し、軸圧縮試験を実施し、荷重を試験機から取得し、変位を DICM によって計測した。試験機には 300kN 万能試験機を用いた。試験風景を Photo 3 に示す。境界条件については、CFRP の弾性係数及び強度が非常に高く、既往の研究で用いていた試験治具では弾性係数の正確なデータが取れない可能性があると判断し、両端自由としている。

Table 2 円筒シェル試験体パラメータ

試験体No	寸法 高さL(mm)	内径r(mm)	外径R(mm)	厚さH(mm)	R/H
A1	60	33	35	2	16.5
A2	110	33	35	2	16.5
A3	160	33	35	2	16.5
B1	60	33	34	1	33
B2	110	33	34	1	33
B3	160	33	34	1	33
C1	60	33	33.5	0.5	66
C2	110	33	33.5	0.5	66
C3	160	33	33.5	0.5	66
D1	60	50	50.5	0.5	100
D2	110	50	50.5	0.5	100
D3	160	50	50.5	0.5	100

7. 複合材料からなる円筒シェルの有限要素解析

7.1 解析概要

有限要素解析は汎用ソフト Marc/Mentat にて行った。本研究で作成した円筒シェルの解析モデルは、径厚比、高さ毎に分割数を変化させ、メッシュの形状が正方形に近い形となるよう分割している。材料特性は直交異方性タイプを選択し、8.1 節で述べた Table.1 の材料定数を各成分方向に与えている。終局の判定は、各成分の引張強度、圧縮強度が同じであると仮定し、破損則に Hill の破損則を用いている。境界条件は下端の節点を 1 点のみ拘束し、軸方向に強制変位を与えるのみとしている。

7.2 複合材料からなる円筒シェルの座屈モード

試験体 A1 及び試験体 D1 における終局後の形状のみを Photo 4, Photo 5 に、DICM により得られたひずみ分布図にて Photo 4～Photo 7 に示す。Photo 4, Photo 6 は試験体 A1, 試験体 D1 の終局時の軸方向ひずみである。Photo 5, Photo 7 は同試験体の面外方向変位である。軸圧縮試験による円筒シェルの終局挙動は、比較的厚肉である試験体 A1～B3 で Photo 4 のような圧壊、比較的薄肉である試験体 C1～D3 では C1 を除いて Photo 7 のようなダイヤモンド座屈が見られた。試験体 C1 は比較的薄肉であるが、ダイヤモンド座屈はみら

れず、両端の圧壊に近い形で終局を迎えている。Photo 5, Photo 7 より、薄肉円筒シェルである試験体 D1 の終局時は、面外方向の変位が大きい一方で、終局の直前に上端に最大軸方向ひずみが表れている。解析モデルのダメージ図を Fig. 16, Fig. 17 に示す。試験体 A1 では実験と同様、両端の要素の剛性が失われているが、試験体 D1 においては Photo 7 のようなダイヤモンドバックリングがみられなかった。

7.3 終局強度比較

軸圧縮試験及び有限要素解析によって得られた荷重－変位曲線を Fig. 18, Fig. 19 に示す。荷重－変位曲線において、試験体 A1 では実験値と解析値の間に 30% の差がみられ、試験体 D1 では 2 倍の差がみられた。本報告では試験体 A1, 試験体 D1 のみ図に示しているが、試験体 A1～D3 の全てにおいて解析値が実験値を上回る結果となった。また、A1～A3 の試験体では、実験値において高さ方向による終局強度のばらつきが見られ、A1 が 120kN, A2 が 78kN, A3 が 90kN と同径厚比の試験体において最大で 35% の差となっている。これに対して No. 4～No. 12 の試験体では各径厚比において高さの違いによる終局強度の違いはみられなかった。



Photo 2 A1 終局後



Photo 3 D1 終局後

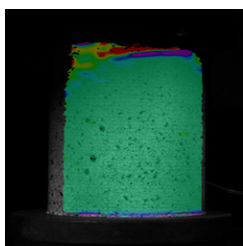


Photo 4 A1 ひずみ

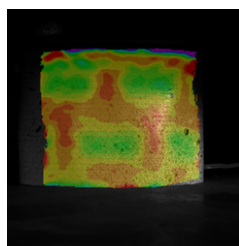


Photo 5 D1 ひずみ

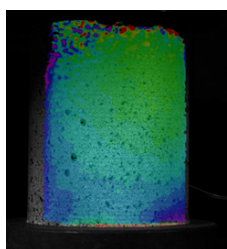


Photo 6 A1 変位

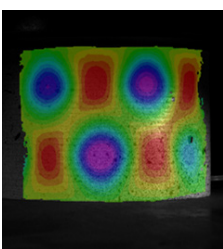


Photo 7 D1 変位

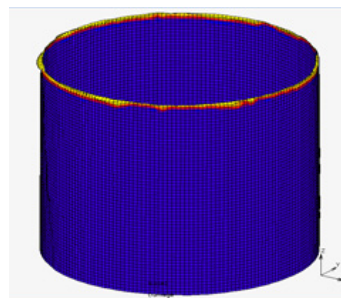


Fig. 16 A1 解析モード

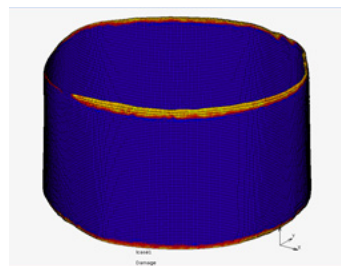


Fig. 17 D1 解析モード

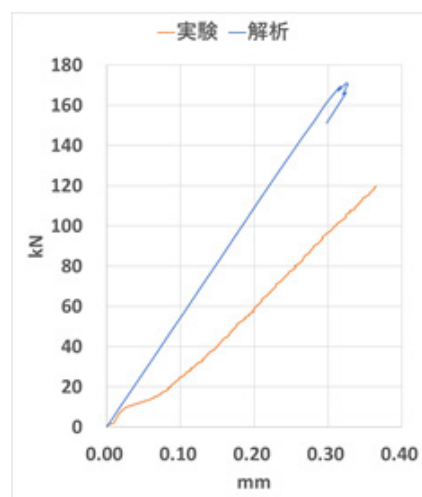


Fig. 18 A1 比較

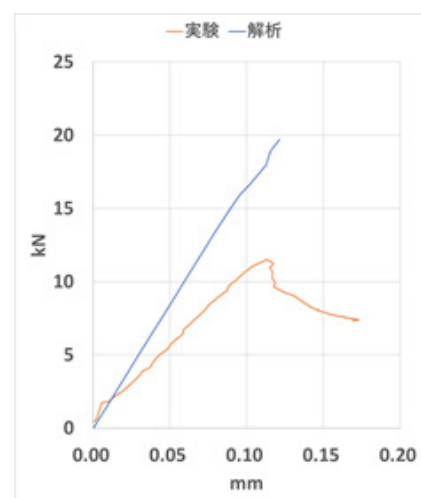


Fig. 19 D1 比較

8. 考察

8.1 等方性材料円筒シェルとの終局挙動比較

等方性材料円筒シェル・複合材料円筒シェルの座屈モードを比較すると、厚肉円筒シェルにおいて、等方性材料の場合ではエレファント座屈、複合材料の場合では両端圧壊での終局を迎えている。比較的薄肉の円筒シェルでは、等方性材料、複合材料共にダイヤモンド座屈がみられるが、等方性材料の場合では座屈後、除荷しても形状が元の円筒状に戻ることはない。一方、複合材料の場合では除荷後、形状が元の円筒状に戻っている。このことから、複合材料からなる薄肉円筒シェルにおいては弾性座屈が発生するものと考えられる。

8.2 複合材料における実験値－解析値比較

試験体 A1～A3 において終局強度にばらつきが生じ、その他の試験体では大きなばらつきがみられなかったことから、厚肉円筒シェルが面外方向の引張強度のばらつきに大きく影響を受けるものと考えられる。また、試験体 B1～D3 において高さの変化による最大荷重のばらつきがみられなかったことから、円筒の高さの違いによる終局強度への影響は本研究のパラメータの範囲内では発生しないと考えられる。

荷重－変位曲線においてすべて解析値が高い値となり、薄肉円筒シェルの座屈モードをシミュレートできなかった理由としては 2 点挙げられる。1 点目は、実験時の境界条件が両端固定でなかったことである。厚肉円筒シェルにおいては Photo 4 に見られるように、面内の剥離が発生しており、解析モデルではこの現象を再現できなかった。薄肉円筒シェルでは、両端の拘束がないために十分な強度を持たなかったと考えられる。2 点目は、解析モデルに適用した形状初期不整は表面のみであり、複合材料を積層することによる面内の幾何学的不連続性について十分な考慮が行えていなかったことにあると考えている。

9. 結論

等方性材料からなる円筒シェルの非線形有限要素解析を行うことによって、形状初期不整を有する薄肉円筒シェルの終局挙動をシミュレートできることを示した。また、統計的なモデルを利用して解析モデルを作成し、統計的評価を行った結果、形状初期不整を有する薄肉円筒シェルの終局荷重応答値は一定の範囲に収まることを示した。

本研究の手法を用いれば、異なる径厚比についての解析を行うことによって形状初期不整を有する薄肉円

筒シェルの終局強度曲線を得ることができるといえる。

なお、Ikeda⁸⁾⁹⁾等は、圧縮力を受ける周辺単純支持板の終局強度が初期たわみの影響により低下するメカニズムについて koiter 則を拡張する事により記述し、有益な結果を示している。本研究では、円筒シェル構造への koiter 則の適用を検討していく計画である。

複合材料円筒シェルと等方性材料円筒シェルの座屈モードの違いを本研究のパラメータの範囲で明らかにすることができた。境界条件を変えることで、更なる座屈挙動の比較が行えるものと考えている。

複合材料からなる円筒シェルの軸圧縮強度について解析を用いて定量的に評価するためには、境界条件及び一方強化板の積層による面内の不連続性について再度検討する必要がある。解析については、一方強化板もしくは炭素繊維、マトリクスそれぞれの材料定数を実験によって求める事が望ましいと考える。

参考文献

- 1) 鬼塚友章、古賀掲維、松田浩：形状初期不整を有する薄肉円筒シェルにおける終局挙動の評価法，2017年度鋼構造年次論文報告集，日本鋼構造協会，pp.426-433，2017.
- 2) 草野壱俊、緒方宇大、松田浩、森田千尋、古賀掲維：薄肉円筒シェル部材の座屈挙動に関する実験・解析的研究，鋼構造年次論文報告集，第22巻，pp.95-101，2014.
- 3) 小宮允人、森田千尋、松田浩、出水亨、古賀掲維、趙程：薄肉円筒シェルの座屈挙動に関する実験及び解析的研究，土木学会西部支部研究発表会，I-31，2015.3.
- 4) 木守靖：座屈設計ガイドライン，pp.221~251，2005.10
- 5) 福田博 他：複合材料の力学序説，pp.63-102，1985.5
- 6) 座古勝 他：複合材料の挙動解析 pp.14-102，1998.3
- 7) 原栄一，横関智弘，八田博志，石川隆司：炭素繊維強化複合材の面外引張特性試験の検討，宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-06-025 2007.3
- 8) Ikeda, K., Kitada, T., Matsumura, M., Yamakawa, Y. : Imperfection sensitivity of ultimate buckling strength of elastic-plastic square plates under compression, International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 42, pp. 529-541, 2007.
- 9) 池田清宏，北田俊行，山川優樹，松村政秀，柴崎晃，狩野祐一：弾塑性板の終局強度の初期不整感度則と確率変動，土木学会論文集A Vol.64, No.4, pp.926-934，2008.11