

小断面木材の弾性曲げで形成する積層ラチスシェル構造の形状形成および座屈崩壊実験

Experimental study on form-finding and buckling of bending-active latticed shells made of small-section timber

工学院大学 教授 山下哲郎

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. はじめに

木造ラチスシェル構造の施工方法として、部材の弾性曲げで曲面を形成するいわゆる bending-active ラチスシェルがある[1-3]。多数の直線部材を接合する曲面形成方法と比べ、接合部が不要で曲面形状を容易に生成することができる。また現場での溶接や組立て、仮設足場等を施工プロセスから省き、軽量な木材を使用することから可搬性・経済性にも優れる。一方、初期曲げを利用する施工方法は、必然的に構造に初期応力を内包し、ラチスシェル構造において重要な座屈耐力に影響を及ぼす。近年、このような部材の初期曲げを考慮したシェルの釣り合い形状を探索する Dynamic Relaxation 法 [4](以降、DR法)など、初期曲げを考慮したラチスシェル構造の解析や実験を行う研究も盛んになっている[5-6]。しかし、DR法などこれらの形状解析手法は特殊な解析ソフトを開発する必要があり、形状解析と初期曲げを考慮した座屈解析を連続して実施することも難しい。

これらの背景から白鳥ら[7]は、形状解析に特化しない汎用有限要素解析ソフトで、偏心を伴って木材を3方向に重ねた籠目格子シェルの形状解析、及び連続して座屈解析を行う手法(以下、ASE&BSE法)を開発した。しかし、この解析手法は実験で検証されていない。

以上より、本研究では、ASE&BSE法による形状、及び座屈解析手法の有効性検討のための、3方向籠目格子シェルの施工、及び座屈実験を実施する。また、ASE&BSE法は解析モデルの断面構成を単層としているが、現存する初期曲げラチスシェルの事例の大半は、面外に対する曲げ剛性を向上させるため断面構成を複層とする事例が多い[1]。従ってここでは単層と複層シェルの実験を実施する。

2. 研究の概要

本研究は、ASE&BSE法による形状・座屈解析手法の有効性を検証するため、単層及び複層の三方向籠目格子シェルの施工・座屈実験を実施する。概要を以下に示す。

施工実験：ASE&BSE法によるシェルの形状解析を行い、求めた完成形状から試験体及び実験装置を設計する。形成したシェルを3次元計測し、形状解析の精度を評価する。

座屈実験：施工実験で製作した試験体にトーナメント装置により鉛直分布荷重を載荷し、座屈実験を実施する。実験と解析から得られた座屈挙動を比較し、座屈解析の精度を評価する。

3. 試験体および実験装置の設計

3.1 単層シェル

試験体は対角長さ 5m、ライズスパン比 0.13、各方向の部材 6 本、正六角形平面、目標曲面は球形である(図 1)。部材の断面は 60×11mm の矩形、材料は杉の無等級材であり、曲げ振動試験(図 2)と動的ねじり試験(図 3)によってヤング係数とねじり剛性を測定した。中央の長い部材 6 本は、エポキシ系接着剤を用いたフィンガージョイント継手で製作し、別途試験して十分な曲げ強度を確認した。

形状解析で得られたシェル形状の交点位置にあらかじめφ12の孔をあけ、組み立て後に摩擦シートを挟み、M8 ボルトを 12Nm のトルクで締めることで部材同士を接合した(図 4)。1, 3 層目交点の場合、部材の間に 60×60×11mm で部材と同じ材料のスペーサーを挟む。

図 5 にシェル境界支持部を示す。座屈後の形状がリンクボールのピン可動域(半開角 8.5°)以内に収まるように、テンションリング側の勾配を境界ごとに調整して設計した。

载荷装置と計測位置を図 6 に示す。ジャッキとトーナメント装置により、载荷点に等分布荷重を静的载荷する。圧縮型ロードセルで荷重を計測し、3D 非接触計測システム VENUS3D R を用いることで計測点の座標を計測した。加えて、座屈解析結果より変位が大きいと予測される 5 点と、テンションリング側面の 3 点に変位計を設置した。



図 1 実験装置と試験体(単層)

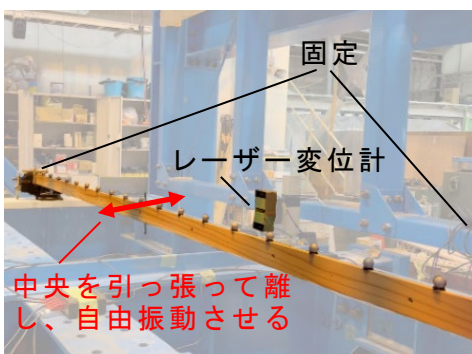


図 2 曲げ振動試験

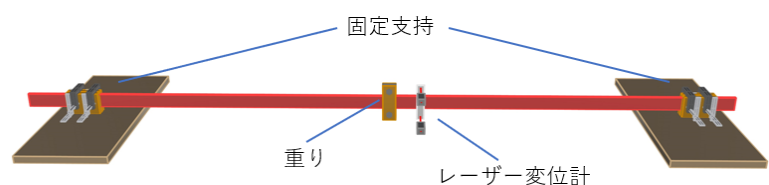


図 3 動的ねじり試験

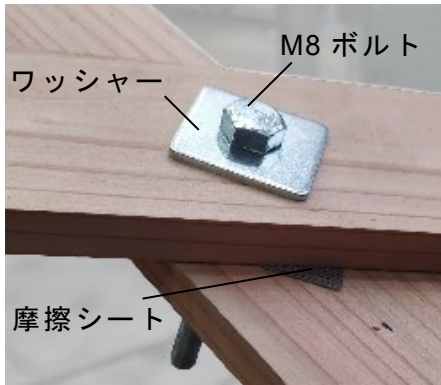


図4 部材接合部(単層)

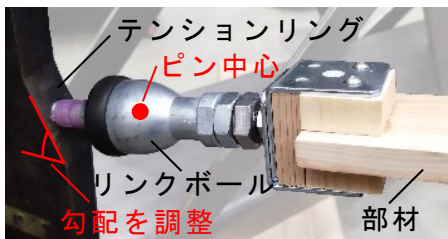


図5 シェル境界支持部(単層)

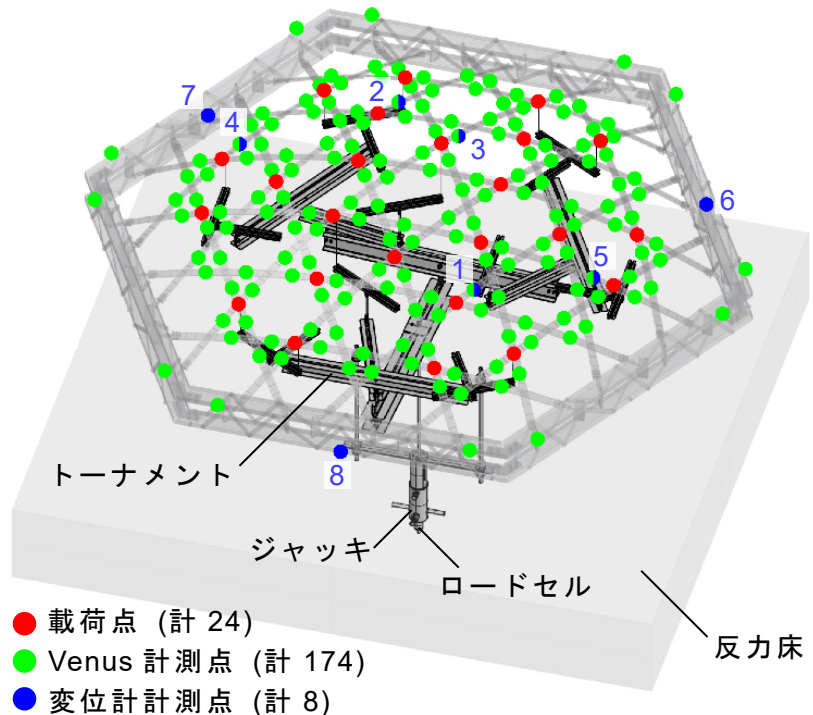


図6 荷重装置と計測位置(単層)

3.2 複層シェル

単層と異なる部分についてのみ述べる。図7に試験体の全体図を示す。部材接合部の構成を図8に示し、ボルトのトルク管理は行わなかった。変位計の設置位置は図9とした。ねじり剛性は、静的ねじり試験(図10)により算出した。図11にシェル境界支持部を示す。多くの複層初期曲げラチスシェルと同様に、上下の弦材の交点間の1箇所を、合板のシアブロック(60×90×21 mm)とM3.3×50mmのビス2本で接合した(図12)。



図7 実験装置と試験体(複層)

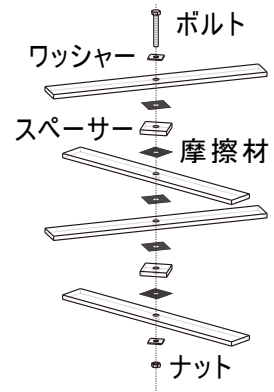


図8 部材接合部(複層)

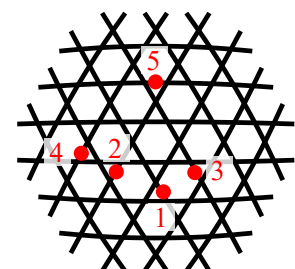


図9 変位計位置(複層)

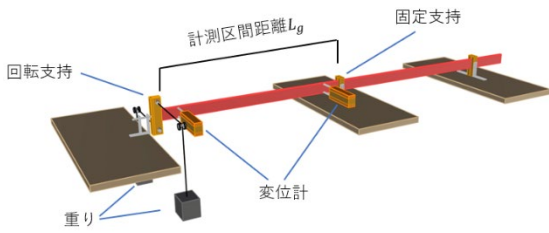


図 10 静的ねじり試験



図 12 シアブロック

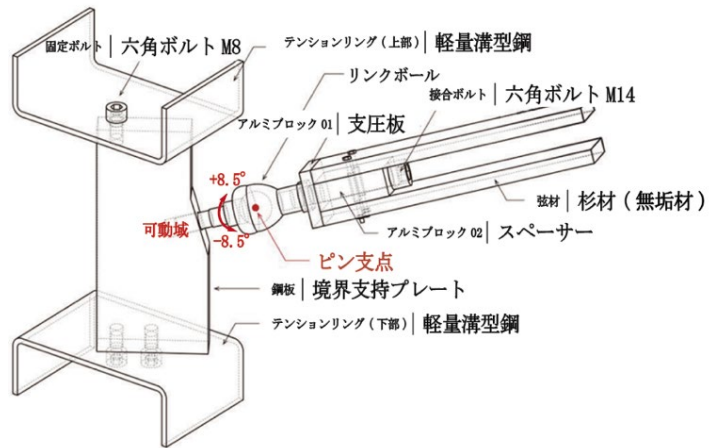


図 11 シェル境界支持部(複層)

4. 解析手法

4.1 単層シェル

文献[7]の手法により、増分法による形状解析と、弧長法による弾性座屈解析を連続実行して実験結果と比較する。全てベルヌーイ・オイラー梁要素でモデル化し、有限要素法解析ソフト Marc Mentat 2022[8]で解析する。

4.2 複層シェル

単層には無いシアブロックをせん断剛性を考慮した梁要素とし、交点で各部材を接合する Rod 要素はベルヌーイ・オイラー梁要素(model-B)とせん断剛性を考慮した梁要素(model-S)の 2 パターンでモデル化して解析を行う。複層での ASE&BSE 法の解析に際し、以下のようなフローを組んだ。

- 1) 境界部を図 13 のようにモデル化することで、形状解析と連続してピン支持による座屈解析を行う。
- 2) 形状解析結果においてシアブロックが交点間の midpoint に位置するように調節し、束材と同様に部材上を滑るモデル化を行った。

重ね透かし梁実験(図 14)を実施し、荷重変形とエネルギー法[9]をよりシアブロックのせん断剛性 K_s を算出しモデル化した。また、ビス M3.3 を基準に、径の異なる M8 ボルトに対しても各種剛性倍率[10](めり込み剛性比、面圧定数比、ヤング係数比)を乗じて概算した。

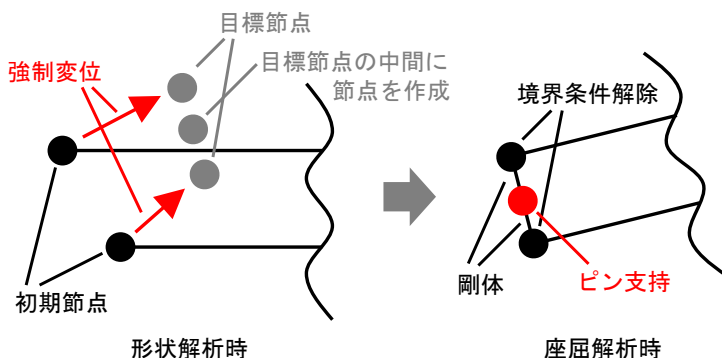


図 13 複層の境界部モデル化

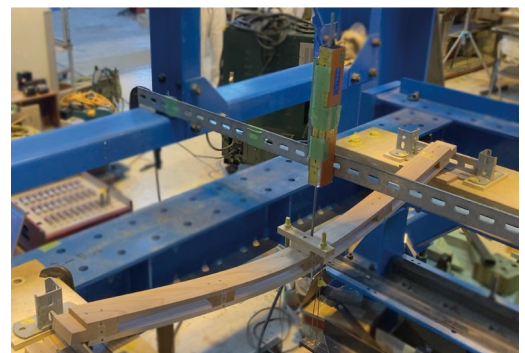


図 14 重ね透かし梁実験

(実験調査によって得られた新しい知見)

5. 実験結果と解析結果の比較

5.1 単層シェル

実験の座屈形状を図 15 に示す。境界付近の一か所が大きく変形する局所座屈モードが見られた。座屈形状は概ね一致しているが、解析と実験結果は位相が鉛直軸周りに180°異なる。接合部付近で1ヶ所割れが生じたが、滑りや回転が生じた接合部は見られなかった。

図 16 は、変位計 1~5 で計測した変位を用いた荷重変形曲線である。座屈荷重の実験値は解析値の約 6 割となり、計測点 1, 4 では初期剛性から大きく異なる。

Venus で計測した座標を基に、解析と実験結果と比較する(図 17)。最大で乖離が面外方向 26mm 程度で、スパンの約 1/200 に達した。座屈した領域では面外方向下向きに最大 18mm 程度であり、初期不整により座屈を誘発し、解析との不一致の原因となった可能性がある。

5.2 複層シェル

実験の座屈形状を図 18 に示す。部材 1, 4 層目方向のスパンの 1/4 と 3/4 点付近が下がる全体座屈モードが得られた。また、単層シェルでは生じなかった大きな軋み音が加力中に数多く発生し、部材接合部の回転とシアブロックと弦材のずれが見られた。

図 19 は、変位計で計測した変位を用いた model-B と model-S の荷重変形曲線である。座屈荷重の実験値は、model-B では解析値の 6 割程となり、この耐力の差は実験で観察された接合部の回転・滑りやシアブロックのずれが、現状の座屈解析で再現できていないことが原因であると考えられる。対して、接合部のせん断剛性を入力した model-S では概ね一致したが、初期剛性が一致していないなど、今後もモデル化を見直す余地がある。

単層と同様に乖離を比較する(図 20)。全体的に乖離の傾向が強く、軸方向に内側への乖離と、それに伴ってシェル外周部が面外方向に下がっている。実際に施工されたシェルは部材交点孔のクリアランスが効き、設計した孔位置では完全に一致しなかったため、現状の解析手法では複層モデルの釣り合い形状を求めることができていないと思われる。



図 15 実験の座屈形状(単層)

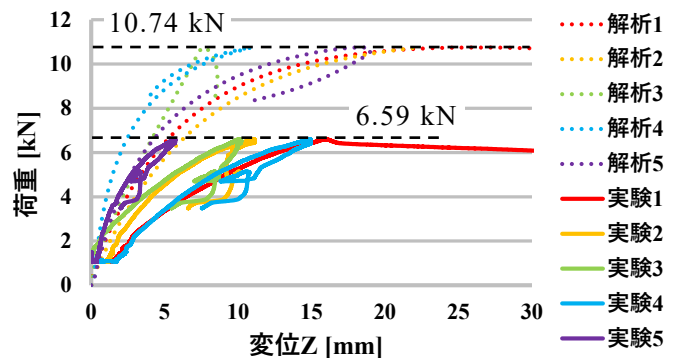


図 16 荷重変形曲線(単層)

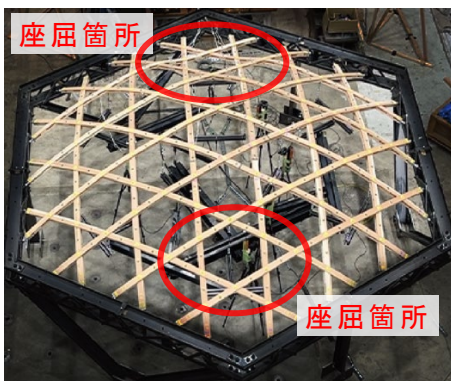


図 18 実験の座屈形状(複層)

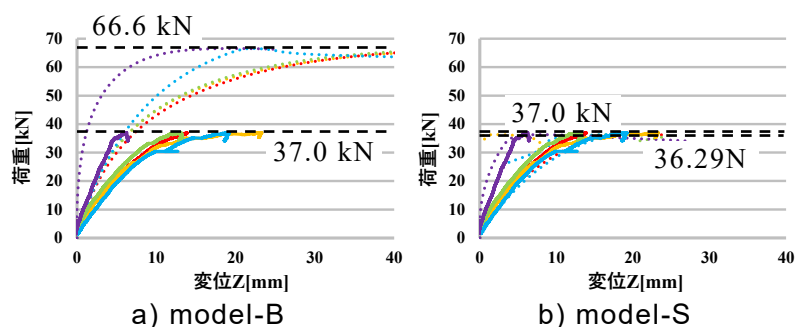


図 19 荷重変形曲線(複層)(凡例は図 16 に基づく)

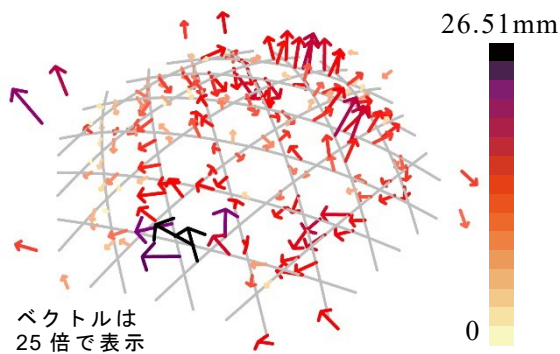


図 17 乖離ベクトル(単層)

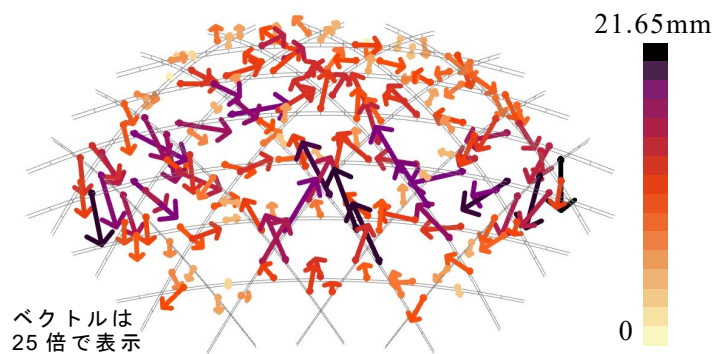


図 20 乖離ベクトル(複層)

6. まとめ

本研究は、文献[7]の解析手法の有効性を検討するため、Bending-active 単層、複層の 3 方向籠目格子シェルの施工及び座屈実験を実施した。以下に検討結果をまとめる。

形状解析

単層の完成形状は比較的一致したが、複層は乖離の傾向が見られた。実際に施工されたシェルの部材交点のボルトがクリアランスのある孔側面に接触し、設計形状通りに部材交点が一一致しなかったことから、今後複層モデルの形状解析の検討を進める必要がある。

座屈解析

単層と複層 model-B は座屈耐力の実験値が解析値の約 6 割になった。複層については、接合部の回転・滑りやシアブロックのずれが解析で考慮されていない。接合部のせん断剛性を入力した model-T では概ね一致したが、今後更なるモデル化の検討が必要である。

参考文献

- [1] E. Happold and W.I. Liddell: Timber Lattice Roof for the Mannheim Bundesgartenschau, The Structural Engineer, Vol.53, pp.99-135, 1975
- [2] R. Harris, J. Rohmer, O. Kelly and S. Johnson : Design and Construction of the Downland Gridshell, Building Research and information, Vol.31, No.6, pp.427-454, 2003
- [3] J. Chilton and G. Tang : TIMBER GRID SHELLS -Architecture, structure and craft-, Routledge, 2017
- [4] B. D' Amico, A. Kermani and H. Zhang: Form finding and structural analysis of activity bent timber grid shells, Engineering Structures 81, pp.195-207, 2014
- [5] R. Mesnil, J. Ochsendorf and C. Douthe: Influence of the pre-stress on the stability of elastic grid shells, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) symposium 2013, Wroclaw.
- [6] 山本憲司, 中村達哉, 本間俊雄: 格子状平板の初期曲げにより形成されるグリッドシェルの形状解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.668, pp.1803-1812, 2011
- [7] 白鳥寛, 山下哲郎: 汎用 FEM ソフトを用いた木造三方向籠目格子シェルの形状解析と座屈解析手法, 日本建築学会構造系論文集, 88 巻 809 号, pp.1145-1155, 2023-7
- [8] MSC Software Inc : Marc 2022
- [9] 三井和也ほか: 薄版軽量形鋼組立圧縮材が一体で曲げ座屈するための必要ドリルねじ本数, 日本建築学会構造系論文集 第 86 巻 第 784 号, 979-990, 2021 年 6 月
- [10] 木質構造接合部設計マニュアル, 日本建築学会, 2009, 第 1 版第 1 刷, p277-280

(発表論文)

- ・ 白鳥寛, 山下哲郎: 汎用 FEM ソフトを用いた木造三方向籠目格子シェルの形状解析と座屈解析手法, 日本建築学会構造系論文集, 88 巻 809 号, pp.1145-1155, 2023-7
- ・ 春日拓実, 荻原健太, 山下哲郎: Bending-Active 木造籠目格子シェルの形状形成および座屈実験 その 1: 単層シェル, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 投稿中, 2024
- ・ 荻原健太, 春日拓実, 山下哲郎: Bending-Active 木造籠目格子シェルの形状形成および座屈実験 その 2: 複層シェル, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 投稿中, 2024
- ・ 中野雅也, 山下哲郎: 振動法による木材のねじり剛性と曲げ剛性の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 投稿中, 2024