公益財団法人大林財団

研究助成実施報告書

助成実施年度	2022 年度
研究課題(タイトル)	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
研究者名※	山下 哲郎
所属組織※	工学院大学 建築学部 建築学科 教授
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

()は、報告書提出時所属先。

大林財団2022年度研究助成実施報告書

所属機関名	工学院大学
申請者氏名	山下哲郎

 研究課題
 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
 (概要)
 本研究では、小断面の木材を弾性域で曲げ、積層して形成するラチスシェル構造(曲げ積層ラチ スシェル) を製作してつり合い曲面を形成した後、鉛直荷重を載荷して座屈させ実際の崩壊挙動 を観察、計測し、直接的に座屈特性を観察するとともに、開発した形状解析と連続した座屈解析 手法の検証を行った。
 実験では、→周を鉄骨トラスのテンションリングとした約 5m スパンのドーム状の単層および複 層の曲げ積層ラチスシェル構造の試験体を上記の形状解析手法にて設計し、試験体の施工後トー ナメント方式で静的載荷して座屈させた。部材には断面が 11x60mm の杉の製材を用いた。形成し た試験体の形状は、形状解析結果とシェル面外方向にスパンの約 1/200 ほどの誤差があり、実験
 で得た座屈す車は単層・複層ともに解析結果の約6割となった。

1. 研究の目的

(注) 必要なページ数をご使用ください。

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、複 雑な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複雑な接合部 の組立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、設計に形状解析を要するとともに、必然的に内包する構造 の初期応力が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 Bending-active ラチス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、形状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 法などの形状解析に 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・山下[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Bending-active 籠目格子シェルの形状解析後に連続して座屈解 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、面外曲げ剛性を増加させる ため断面構成を複層(部材を2層に重ねる)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2つの試験体を製作して実験を実施し、ASE&BSE 法の複層シェルに対する適用性も評価する。

2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

2.1 実験の概要

面は球形である。

形状解析により試験体を設計し、部品を製作した後、施工実験と座屈実験を実施した。施工実 験では形成したシェルを3次元計測して形状解析の精度を評価し、座屈実験では施工実験で完成 した試験体にトーナメント装置により鉛直分布荷重を、最大耐力点を越えるまで載荷して座屈崩 壊させ、実験で得られた座屈挙動を解析と比較し、座屈解析の精度を評価した。 2.2 試験体

強な六角形のテンションリングを配置し、シェルのスラストを負担させた。形状解析時の初期曲

図1に単層、図2に複層試験体全容を示す。試験体は対角長さ約5m、ライズスパン比0.13の正 六角形平面ドーム状ラチスシェルで、3方向の部材6本を単層では3層、複層では6層に重ねて シェル面を形成する。外周には軽量溝型鋼を弦材、平鋼を斜材とする鉄骨トラスで構成される剛

木造ラチスシェル 、 テンションリング(鋼製)



図1 単層ラチスシェル試験体



図2 複層ラチスシェル試験体

部材は11×60mmの矩形断面の杉の無等級材であり、曲げ振動試験(図3)とねじり振動試験(図4)によって使用した全部材の曲げ剛性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を用いて製作し、継手部の曲げ試験も実施して十分な曲げ強度を確認した。



図3 曲げ振動試験

形状解析で得られた部材の交点の位置にあらかじめ ¢12 の孔をあけ、組み立て時に接合面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することで接合面の滑りを回避することを試みた(図 5)。1,3 層目の交点の場合、部材同士の間に 60×60×11mm で部材

と同じ材料のスペーサーを挟んで調整している。複層ラチスシェルでは、実際の複層ラチスシェ ルで用いられるシアブロックを部材の中間に設置し、複層部材同士を M3.3×50mm のビス2本で 接合した(図6)。ビスを打つ際の割れを防止するためシアブロックには合板を使用した。

図7にシェル境界のラチスシェル部材とテンションリング接合部を示す。境界条件を明快にするため接合部には完全ピン接合となるユニバーサルジョイント(リンクボール)を使用し、座屈後大変形を生じた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、テンションリング側の接合 プレートの勾配を接合部ごとに調整して設計した。



2.3 計測と加力

図8 載荷と計測

載荷装置と計測位置を図8に示す。ジャッキとトーナメント装置により、載荷点に等分布荷重 を静的載荷する。ジャッキに設置した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 VENUS3DRを用いることで計測点の座標を3次元計測した。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点に機械式変位計を設置し、VENUS3DRの計測 精度を確認した。

2.4 形状解析と座屈解析

文献[7]の手法により、部材接合部を滑らせるモデルを用いた増分法による形状解析と、形状形 成後に接合部を固定したモデルによる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。

複層シェルでは、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 材を接合する束の要素はせん断変形の生じないベルヌーイ・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9のようにモデル化し、形状解析と連続してピン支持による座屈解析を行う。2)完成形状においてシアブロックが交点間の中点に位置するようにあらかじめシアブロック節点

の位置を調節し、接合部の束材と同様に部材上を滑るモデルにより形状解析を実施した後、シア ブロックを固定して座屈解析を行った。

重ね透かし梁実験(図 10)を実施し、荷重変形曲線にエネルギー法による基本式[9]を適用し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、接合部の径の異なる 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10 重ね透かし梁実験

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

3.1 単層シェル試験体

木材を曲げて形成した試験体の計測点を Venus3D で計測した座標を基に、実験結果と解析結果 を比較する。図 11 は両者の乖離をベクトルで表示したもので、最大の乖離が面外方向に 26mm と 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乖離が最大 18mm 程度であり、 この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。

実験の座屈形状を図 12 に示す。境界付近の一か所が大きく変形する局所的な座屈モードが見 られた。座屈モード形状自体は解析と概ね一致したが、位相は鉛直軸周りに 180°異なる。接合 部付近で1ヶ所割れが生じたが、接合部には滑りや回転が生じた痕跡は見られなかった。

図 13 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 では初期剛性の段階から実験結果が明らかに低い。



3.2 複層シェル試験体

単層と同様に完成形状を解析と比較する(図 14)。単層と比較して全体的に乖離が大きく、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。複層であるため接 合部では計4本の部材を重ねることとなり、施工誤差を吸収するための部材交点孔のクリアラン スが効き、解析の孔位置と完全に一致していないため、現状の解析手法では複層モデルの釣り合 い形状を正確に求めることができていないと思われる。

実験の座屈形状を図 15 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 座屈モードが生じた。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、特に座屈直前 に数多く発生し、特に座屈部付近で接合部のずれやシアブロックと弦材のずれが観察された。

図 16 は、変位計で計測した位置の変形と 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、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座屈耐力の差の原因であると考 えられる。接合部のせん断剛性を入力した model-S では座屈耐力は概ね一致したが、初期剛性は あまり一致していない。



4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本助成により、少なくとも日本では前例を見ない木造のBending-active 籠目格子シェルの形 状形成と座屈実験を実施でき、既報の解析法との比較検証を実施することができた。

しかしながら実験の座屈荷重は解析の約6割であった。乖離の原因として完成形状の不一致 や、座屈時の接合部の滑りやめり込みなど解析モデルに考慮されていない現象が考えられる。前 者については、解析形状からの乖離の原因をまず施工誤差と仮定し、感度解析を用いて分析する。 すなわち、部材全長、接合部と境界節点の位置、部材剛性に誤差を有するとして、解析で影響の 大きな要因を抽出する。木材の弾性剛性のばらつきの影響については、鋼材など弾性剛性のばら つきの小さい材料を用いた別の小規模模型を製作して3D計測し、再度形状解析の精度を確認す る。

複層試験体でも試験体の形状と解析結果に大きな差が生じたが、こちらは形状解析のモデルお よびプロセスと実際の施工方法が若干異なる。実際の施工方法を反映した形状解析のモデル化と 方法を検討する。また複層では座屈直前に座屈部付近で複数の接合部とシアブロックで滑りが観 察されており、座屈解析における滑りのモデル化が必要である。このモデル化のための要素実験 などが今後必要である。

【参考文献】

[1]E. Happold and W. I. Liddell: Timber Lattice Roof for the MannheimBundesgartenschau, 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 GRIDSHELLS -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