

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 22 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 関西学院大学建築学部建築学科

氏 名 : 荒木美香

研究課題名 : オーゼティックを用いた金属板自由曲面シェル構造の開発

助成金額 : 100万円

研究実施期間 : 自 令和7年4月1日 ~ 至 令和8年3月31日

オーゼティックを用いた金属板自由曲面シェル構造の開発

Development of Free-Form Metal Plate Shell Structures Utilizing Auxetic Geometry

関西学院大学建築学部建築学科 准教授 荒木美香

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. はじめに

オーゼティックという幾何学を応用したメタマテリアルに注目が集まっている。オーゼティックとは、一方向に引張力を加えると、直交方向にも変形が拡大するという負のポアソン比をもつ性質の幾何学である(図1)。オーゼティックは柔軟な変形特性をもつことから、自由曲面の形成が期待できる。医療分野や工業分野では実用化が進んでいるものの、建築分野での研究事例は少ない。

一方建築分野では、コンピューショナルデザインの普及により、意匠計画性及び構造合理性を追求した自由曲面シェルの実現事例が増加している。しかし一般的に非可展面である自由曲面は、その成形方法に課題がある。鉄骨の場合は船舶のぎょう鉄技術の応用や、鋳造の採用が考えられるが、技術的には高度でありコストがかかる。コンクリートの場合は、自由形状の型枠をいかに製造するかという課題に帰着する。このように構法・施工の観点から、自由曲面を簡易に成形する手法の開発が望まれる。

そこで本研究では、オーゼティックの幾何学を利用した自由曲面シェル構造を開発することを目的とする。近年研究代表者らは、金属薄板に正三角形の“オーゼティック・パターン”による切り込みを施し、その面外方向に等分布荷重をかけることによって、自由形状の懸垂面を形成する設計手法を開発した(図2)。切り込みの角度及び切り残し寸法が大きくなるほど軸剛性が高く懸垂後のサグが小さくなるという性質を応用して、平面状の金属薄板に切り込み角度の異なるパターンを施すことで、単純な放物面ではない、自由形状の曲面を成形するというものである。これまでに、材料試験レベルでの引張性能の把握、メカニズムの解明を目的とした引張試験を再現する弾塑性解析手法の検証、パターン入隅部のRの有無による力学特性の差異についての実験および解析的検証、600mm×600mmの四辺固定ステンレス板の面外に等分布荷重をかけたシェルの成形実験および圧縮試験を行ってきた。本報では、建築スケールに拡張することを目指した治具開発およびシェル成形実験、自由形状に拡張することを目指したガウス曲率負の曲面形成手法の開発を行った。

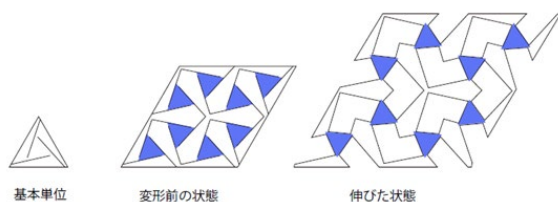


図1 オーゼティック・パターンの変形過程

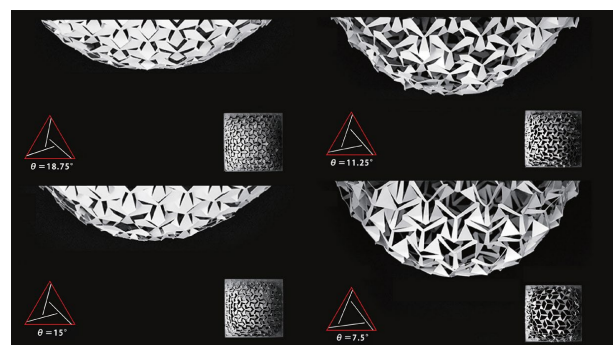


図2 切り込み角度とサグの検証模型

(実験調査によって得られた新しい知見)

1. 中形シェル懸垂試験

小形のプロトタイプを建築スケールに拡張することを目的とし、1000mm×1000mm の四辺固定ステンレス板からシェルを形成するための治具開発およびシェル成形実験を行った。

(1)試験体

図 3 に試験体図を示す。外形 980mm×980mm、厚さ 2mm のステンレス板 (SUS2B) の中央 900mm×900mm の範囲に、切り込み角度を $\theta=0$ 度とした正三角形の切り込みを繰り返し配置した。境界条件は四周を中ボルト M12 で固定する四辺固定とした。

(2)加力治具の開発

疑似的に等分布荷重をかける手法として、一点の加力点から枝分かれさせて荷重を分散させるトーナメント方式の加力治具を開発した。治具の詳細を図 3 (中・右) に示す。横架材には孔あきのフラットバー、鉛直材には鎖状に 2 段連ねたシャックルを使用した。載荷点は図の切り込み Y 字中央に赤丸で示した 72 点とし、この位置で試験体に孔を開け、高ナットを介してアイボルト M4 を設置した。

(3)加力および計測方法

加力は油圧ジャッキによる鉛直上向きの単調加力とした。前述の試験体と治具との接合部における高ナットにひずみゲージを取り付けて張力を測定し、荷重分布を調べた。またワイヤ式変位計により試験体中心部の変位を測定した。

(4)実験結果

懸垂時の荷重変形曲線および最大変形時の写真を図 4 に示す。変位が 40mm 程度に達してから切込みが面外に変形し、剛性が低下した。その後ほとんど線形で変形が進行した。また、荷重分布は変形量が小さい外周部付近に大きな荷重が偏在する傾向にあった。

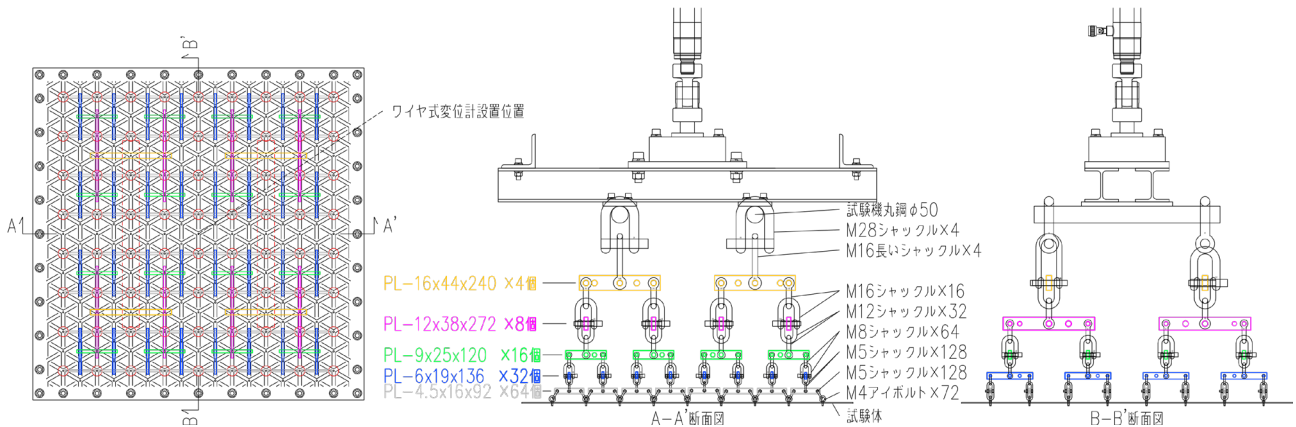


図 3 試験体図および治具図

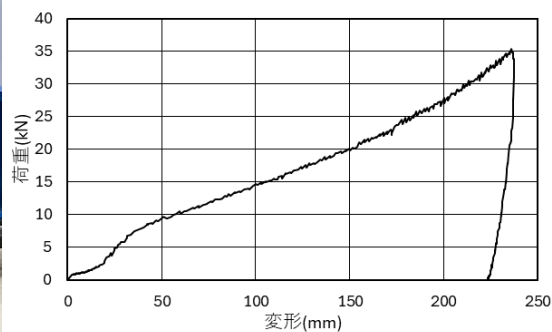


図 4 実験結果

2. ガウス曲率負の鞍型曲面形成手法

2. 1 序

(1)背景と目的

これまで本手法の対象は、ガウス曲率正のドーム形状曲面に限定されていた。そこで、より自由度を高めるためにガウス曲率負の鞍型曲面を成形することを目指す（図 5 右）。具体的には鞍型曲面を成形する懸垂試験を行い、幾何学的非線形解析により再現を試みることを目的とする。

(2)ガウス曲率負の曲面に適したオーゼティック・パターンについて

鞍型曲面形成時は微小要素のせん断変形（図 6）により曲率が増大するため、引張応力に加え圧縮応力も生じる。本研究では図 7 に示すオーゼティック・パターンを採用した。金属板を切り抜くことで圧縮方向の変形が可能となる。

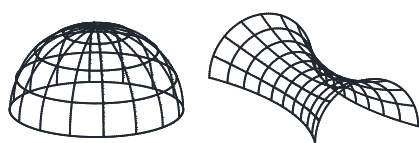


図 5 ガウス曲率正と負の曲面

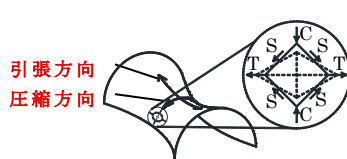


図 6 微小要素のせん断変形

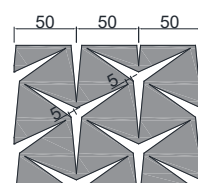


図 7 ガウス曲率負の曲面に適したパターン

2. 2 材料試験

(1)材料引張試験

ヤング率を明らかにするため、図 8 の試験体（SUS2B、板厚 1 mm）2 体に対し 3 ヶ所破断するまで引張方向に加力した。応力度—ひずみ曲線を図 9 に示す。1 体目の結果をもとに最大荷重の 2/3 に到達時点のひずみエネルギーが等価となるバイリニアモデルを設定すると、ヤング率は弾性域で 1124N/mm^2 、塑性域で 28.06N/mm^2 となり、従来のパターンと比べて二次剛性が小さい結果となった。

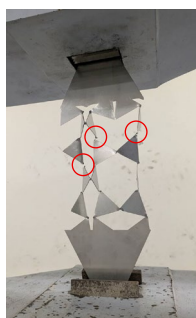
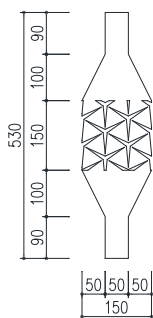


図 8 引張試験体(左:図面,右:破断時の様子)

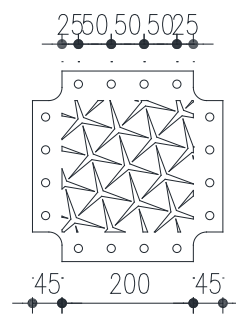


図 10 純せん断試験体(左:図面,右:破断時の様子)

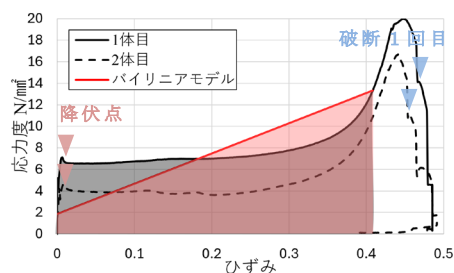


図 9 引張試験 応力度—ひずみ曲線

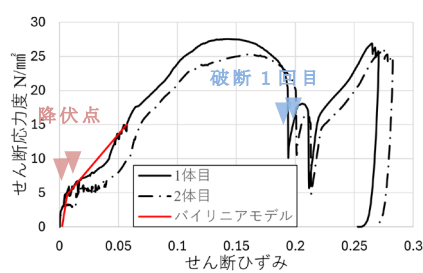


図 11 純せん断試験 応力度—ひずみ曲線

(2)材料純せん断試験

せん断弾性係数を明らかにするため、図 10 の試験体（SUS2B、板厚 1 mm）2 体に対し 3 ヶ所破断するまで引張方向に加力した。応力度—ひずみ曲線を図 11 に示す。1 体目の結果をもとに材料引張試験と同様にバイリニアモデル化すると、せん断弾性係数は弾性域で 531.3N/mm^2 、塑性域で 102.0N/mm^2 となった。

(3)ポアソン比の算出

二つの材料試験で得られたヤング率 E 、せん断弾性係数 G を用いて、式（1）よりポアソン比 ν を算出した。その結果、弾性域では $\nu=0.06$ 、塑性域では $\nu=-0.86$ となり、塑性域でオーゼティック構造の特徴である負のポアソン比が確認された。

$$\nu = E / (2 \times G) - 1 \quad (1)$$

2. 3 懸垂試験

(1)実験方法

図 12 の試験体（SUS2B、板厚 1 mm）を半円のアーチ状にした状態で図 13 の治具に固定し、アーチ中心方向に油圧ジャッキで引っ張ることで鞍型曲面を成形した（図 14）。一点の加力点から試験体全体へ荷重を分散させるトーナメント方式治具からワイヤーを放射状に出し、荷重を分散することで計 60 点にアーチ中心方向への等分布荷重をかけた（図 4.3）。変位は試験体中心に取り付けた変位計で測定し、45 mm 到達付近で除荷した。

(2)実験結果

懸垂後の試験体の様子を図 15 に、荷重—変形曲線を図 16 に示す。最大変位 46.491 mm 到達時の荷重は 4.282kN、除荷後の残留変位は 29.235 mm であった。

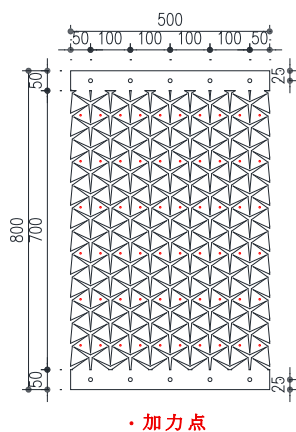


図 12 試験体図

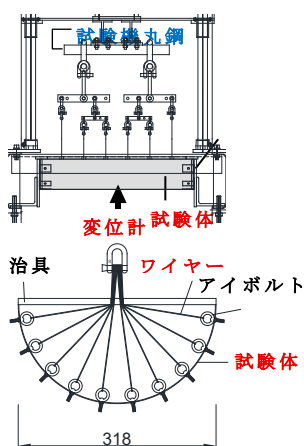


図 13 加力治具



図 15 懸垂後の試験体

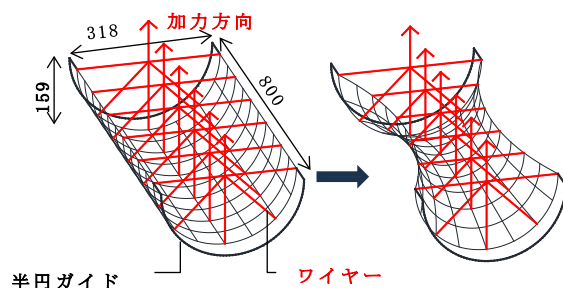


図 14 加力方法

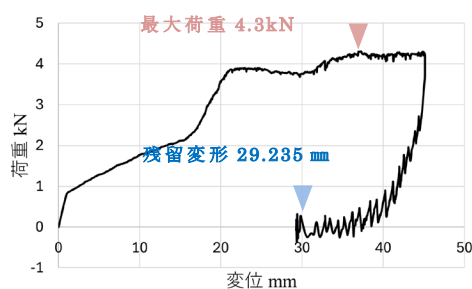


図 16 荷重—変形曲線

2. 4 幾何学的非線形解析

(1)解析方法

懸垂試験を再現するため、高さ 50mm の正三角形線材メッシュをアーチ状にした解析モデルを作成し、構造全体が最大変位 46.471mm の双曲回転体形状となるような強制変位を段階的に与える変位増分での幾何学的非線形解析を行った(図 17)。部材は曲げおよびねじりを負担しないトラス要素とし、軸剛性および降伏軸力は純せん断状態と等二軸状態の 2 種類で仮定し、それぞれの構成方程式と等価になるように算出した。また、増分解析の過程で降伏軸力に到達した線材の軸剛性を一次剛性から二次剛性に低減した(表 1)。

(2)解析結果

図 18 に懸垂解析後の変形図を、図 19 に荷重－変形曲線を示す。純せん断状態を仮定した場合は実験結果と大きな乖離があった一方、等二軸状態を仮定すると実験結果の再現度が向上した。これは曲率増大に伴うせん断応力よりアーチ方向の圧縮応力が卓越すること、解析上の応力状態は主応力の 2 方向とも圧縮となっているからであると考察した。

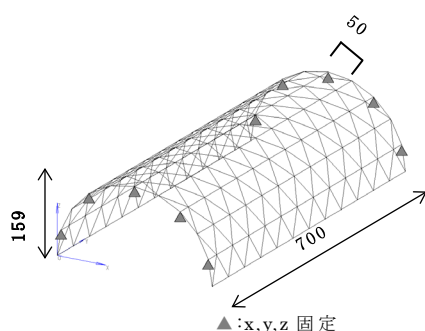


図 17 解析モデル

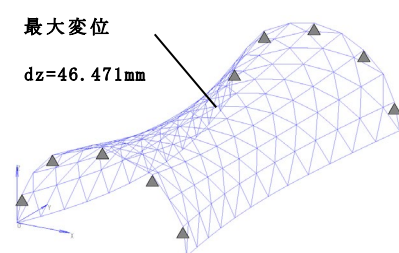


図 18 懸垂後変形図

表 1 線材メッシュ置換の方法と解析諸元

仮定する応力状態		純せん断状態	等二軸状態
モデル図			
線材の有効幅		$b_s = \frac{4}{3(1+\nu)} a$	$b_s = \frac{2}{3(1-\nu)} a$
軸剛性(kN)	一次	70.81	39.78
	二次	13.60	0.502
線材の降伏軸力(kN)	引張	0.447	0.062
	圧縮	0.223	

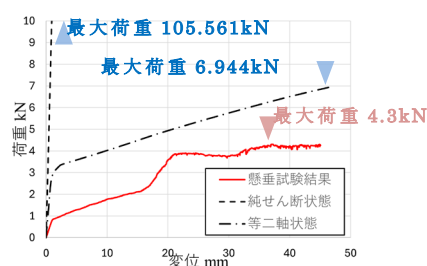


図 19 実験結果と解析結果の比較

3 まとめ

本研究では、従来のオーゼティック構造の中形シェルおよびガウス曲率負の曲面への適用可能性について、実験および解析の両面から検証し、その展望と課題を明らかにした。

(発表論文)

- 宮本直毅、荒木美香、氏岡啓威：オーゼティック構造を利用したガウス曲率負の鞍型曲面形成手法に関する研究、日本建築学会大会学術梗概集、2026 年 9 月（投稿中）
- Naoki MIYAMOTO, Hirotaka UJIOKA, Chinatsu OFUSA, Mika ARAKI : Formation method of saddle-shaped surfaces with negative Gaussian curvature using auxetic structures, IASS, 2026（投稿中）