

研 究 報 告

令和 7 年 4 月 24 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 : 芝浦工業大学

氏 名 : 小澤 雄樹

研究課題名 : カーフベンディング技術を用いた Active-bending シェル構造の形状制御

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 6 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 7 年 3 月 31 日

カーフベンディング技術を用いた Active-bending シェル構造の形状制御

Form control of Active-bending shell structures using kerf bending technique

芝浦工業大学建築学部 教授 小澤雄樹

(研究計画ないし研究手法の概略)

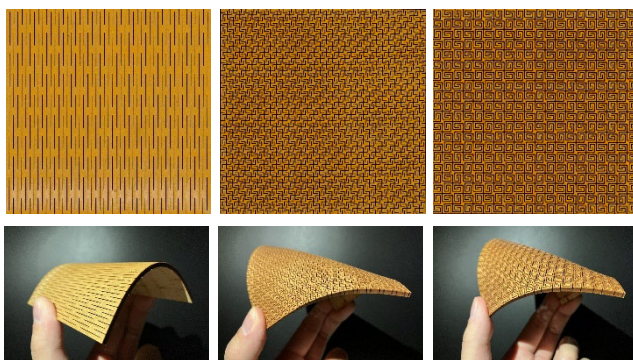
1. はじめに

Active bending とは、柔軟な材料に曲げ変形を付与することで空間構成に利用する手法である。部材の曲げ加工なしにアーチやドームなどの空間を容易に構成可能であるが、完成後の空間維持のためには適切な剛性のコントロールが必要とされる。本研究では Active bending 構造を実現するための新たな手法としてカーフベンディング(以下、「KB」)技術に着目する。

KB とは、近年のデジタルファブリケーション技術の進歩に伴い普及した手法で、木質板などの平板状の部材にレーザーカッターや NC ルーター等のカッティングマシン(CM)を用いて開口やスリット、切り欠き等のカーフ (Kerf、切り込み) を施すことで曲げ剛性などの構造性能を意図的に低下させ、変形性能を高める技術である。カッティングマシン以外の特別な設備を必要とせず、プロダクトデザインから建築に至るまで幅広い分野への適用が期待されている。この技術の特徴は、カットパターンやその密度によって面外曲げや軸力、面内せん断に対する剛性が変化することである。

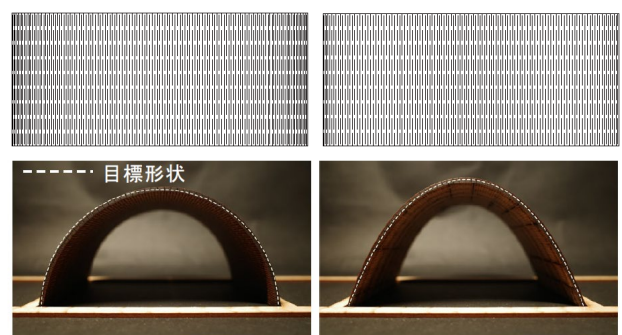
本報では、KB 技術を建築分野に適用し、自由曲面を持つシェル構造の形成に応用することを試みる。その過程で、この技術が建築設計や施工プロセスに与える影響を明らかにし、新たな可能性を探究するための基礎的な研究に取り組む。

研究代表者らはこれまで、本技術を用いたアーチ構造の形状制御に関する研究に取り組み、一定の成果を得た(図2、参考文献1))。本報では、これを2方向の曲率を有するシェル構造に応用し、KB 技術を活用した複曲率シェル構造の形成手法を提案する。ここではシェル形状形成後、モルタルや接着剤等でカーフの隙間を充填し、形状を固定して(「形状固定処理」と呼ぶ)構造物として使用することを想定する。形状固定処理後のシェル構造に対して遺伝的アルゴリズムを用いて歪みエネルギーを最小化する形状を探索することを試みる。これらの検討により提案手法の有効性を検証することで、KB 技術の潜在的可能性を具体的かつ実用的な形で示し、建築分野での応用可能性を探索する。



(a) スリット型 (b) 卍型 (c) 螺旋型

図1 KBのカーフパターンの例



(a) 半円アーチ (b) 懸垂線アーチ

図2 アーチ構造の形状制御の例
(上:カットパターン 下:形成されたアーチ)

2. カーフパターンの配置

KB によりシェルなどの複曲率を有する曲面を形成し、それをコントロールしようとする
と、解析モデルが複雑かつパラメータが多くなり、数値解析が困難になることは容易
に想像できる。そこでここでは、剛性の高い Main structure、低剛性の Sub Structure の 2 種類
に分け、Main structure 部分のみ剛性を変化させることで全体形状を制御することを試みる。
それにより、既往研究で得られた知見を有効に生かすことも可能になる。

ここでは支点間距離が 400mm、厚さ 2.5mm の MDF 製の正方形平板に強制変位を与えるこ
とでシェル形状を形成する場合を想定する。外周及び対角線部分に 20 mm 幅を有する Main
structure、その間を満たすように Sub structure を配置する。Main structure のカーフはスリッ
ト間隔 2mm のスリット型とし、主に一方方向にのみ曲げ変形することを想定する。設計変数
はスリットの開口割合（幅に対するスリットの長さ） A_R とし、これを変化させることで剛性
を制御する。面状の Sub structure 部分は 2 方向に容易に曲げ変形可能な螺旋型とする。螺旋
の形状やサイズなどの詳細は図中に示す。

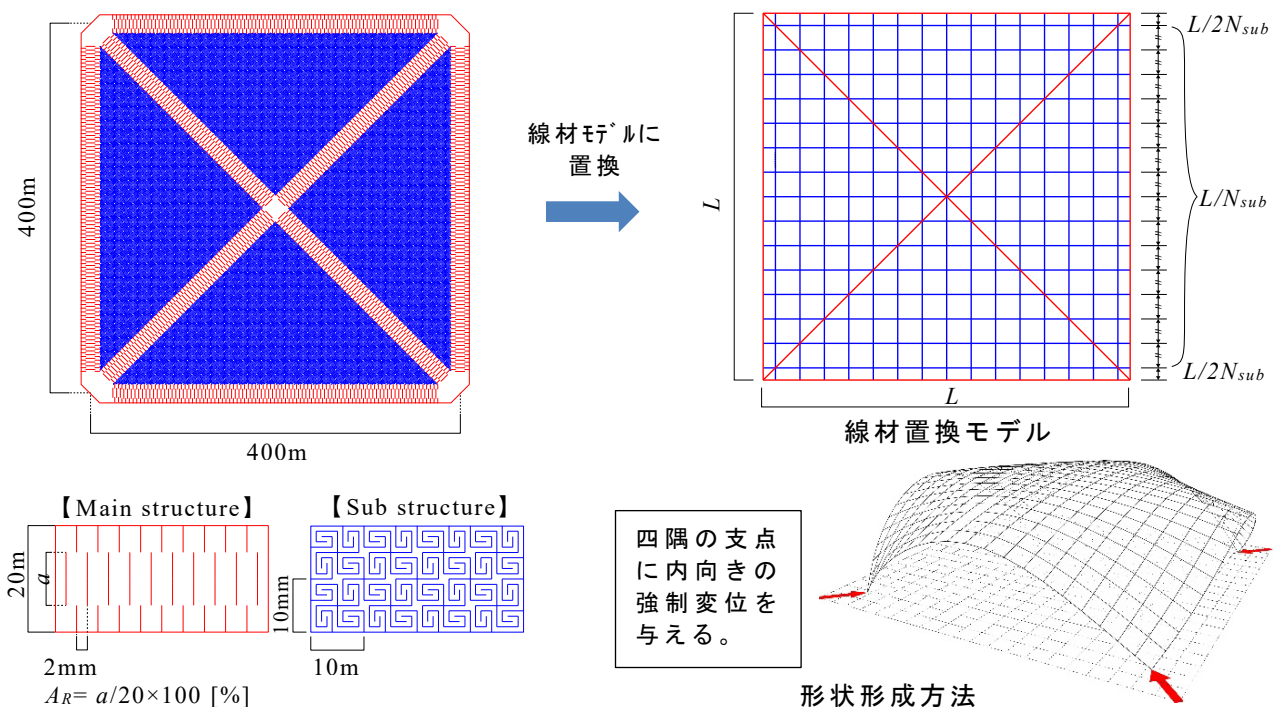


図 3 カーフパターンの配置と線材置換、形状形成方法

3. シェル形状の形成手法と形状固定処理

シェル形状の形成は、四隅を対角線方向にのみ水平移動可能なピン支点到内向きの強制変位を加え、全体曲げ変形を誘発することにより行う（図 3 形状形成方法）。パラメトリックに解析的検討を実施するに当たり、FEM 等でスリットパターンをそのままモデル化することは節点数が膨大となり現実的とは言えない。そこで、Main structure と Sub Structure をそれぞれ等価な剛性を有する梁要素に置換し、図 3 線材置換モデルに示すような簡易化された格子状のモデルで検討を行うことを試みる。

4. 設計変数－剛性の関係式の導出

ここでは数値解析により Main structure、Sub structure それぞれにおいて、カーフパターンが剛性に与える影響を評価する。

使用材料は、厚さ $t=2.5\text{mm}$ の MDF 板 ($E=2500\text{N/mm}^2$, $\nu=0.2$, $\gamma=7.84\times 10^{-6}\text{N/mm}^3$) とする。
また、解析ツールに関しては、モデリングツールとして Grasshopper、構造解析用ライブラリとして OpenSees を使用する。

Main structure の解析モデルを図 4,5、得られた α - A_R 関係を図 6 に示す。 A_R が増大することによって軸、面内せん断、面外曲げ等の剛性が減少していることが確認できる。

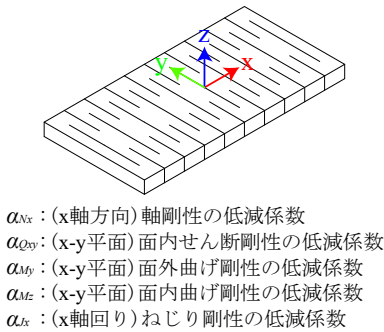


図 4 Main structure の
低減係数

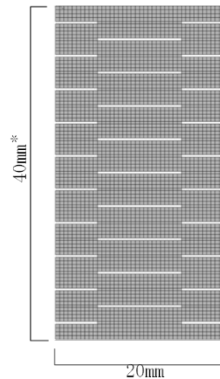


図 5 $A_R=50\%$ の場合

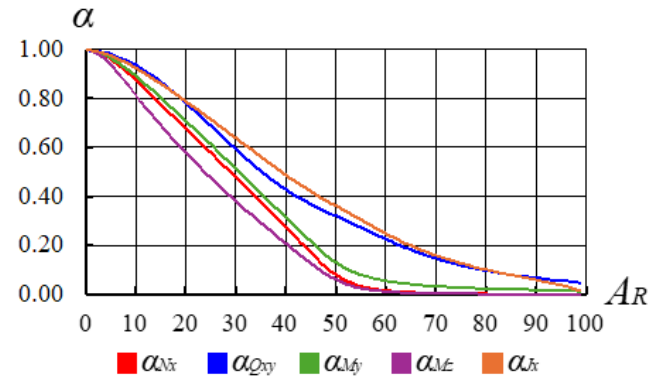


図 6 A_R - α 関係

5. GA を用いた最適形状の探索

遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた最適形状探索のフローを図 8 に示す。GA の実行プラグインとしては Wallacei を使用し、諸条件は以下のように設定する。

Generation size: 50

Crossover Probability: 0.9

Mutation Probability: 0.1

Crossover Distribution Index: 20

Mutation Distribution Index: 20

①解析モデルの作成

前世代の生き残りに交叉、突然変異等の操作を施すことで解析モデルを作成する。ここで用いるモデルは線材に置換した格子梁モデルとし、GA の遺伝子として設定するのは図 7 に示す計 14 要素のスリット率 A_R であり、変動範囲は 20~80% (1%刻み) とする。

②強制変位によるシェル形状形成 (解析 1)

発生させたモデルに対して対角線スパンの 15%に相当するを 42.43mm の強制変位を与え、シェル形状を形成させる。解析は大変形を考慮した幾何学的非線形解析による。

③面要素モデルへの置換

形成された形状に対して、形状固定処理を施すことを想定して得られた節点位置はそのままに三角形要素を用いて面要素のモデルを作成する。

④鉛直外力に対する弾性解析 (解析 2)

面要素モデルについて 100N/m^2 の等分布鉛直荷重を作用させた弾性解析を実施する。

⑤歪エネルギーの算出と評価

各モデルについて、鉛直荷重により蓄えられた歪エネルギーを $U = W_{out} = \frac{1}{2} \int F \cdot \delta$ により外力がなす仕事量として算出する。これを最適化における目的関数として設定する。

⑥次世代の解析モデルの作成

各モデルの目的関数を評価し、低評価のモデルを淘汰させる (①に戻る)。

以上のプロセスを目的関数が十分に最適化されるまで繰り返す。GA の終了条件は、目的関数 (歪みエネルギー) の最小値が 20 世代連続で更新されない場合とした。

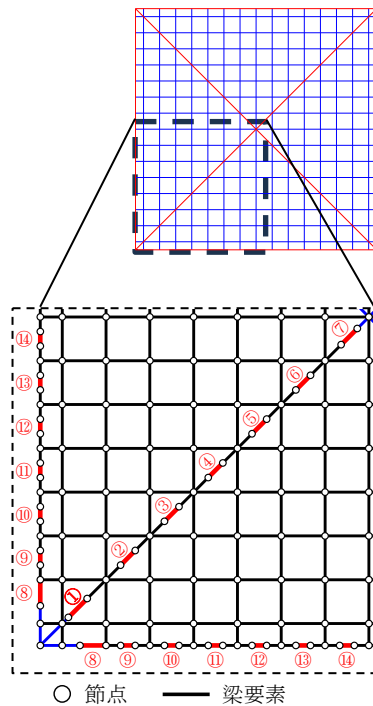


図 7 剛性を変化させる
Main Structure

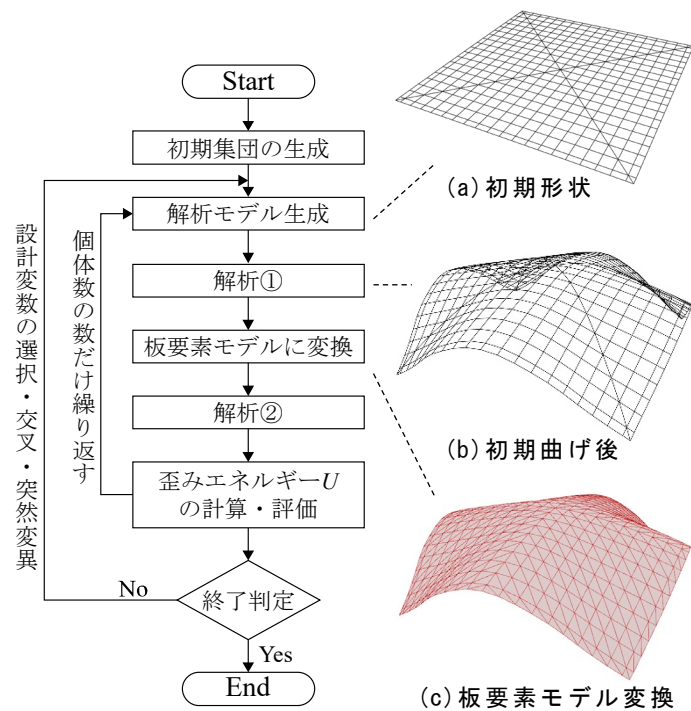


図 8 GA による最適化のプロセス

解析結果の一例を図 9 に示す。世代が進むに従い目的関数が推移し、167 世代目で $U=0.0281\text{Nmm}$ に収束する。比較対象として一律 $A_R=50\%$ としたモデル(基準モデルと呼ぶ)の歪みエネルギーを求めると、 $U_{\text{Base}}=0.0538\text{Nmm}$ となるため、本手法によって歪みエネルギーを 48% 程度減少させていることが確認できる。本手法の有効性を確認できた。

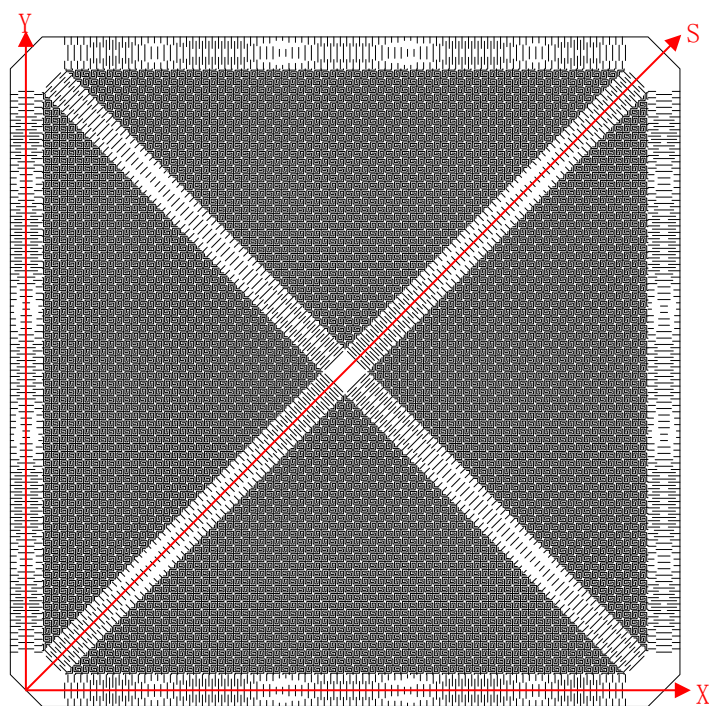
6. 実験的検討

今回は紙面の関係で省略するが、提案した GA 手法をアーチ模型に適用した場合の形状形成実験及び形状計測、カーフパターンを施したパネルの剛性評価実験などの実験的検討を同時に進めた。成果は発表論文 1、2 に掲載されているので参照いただきたい。

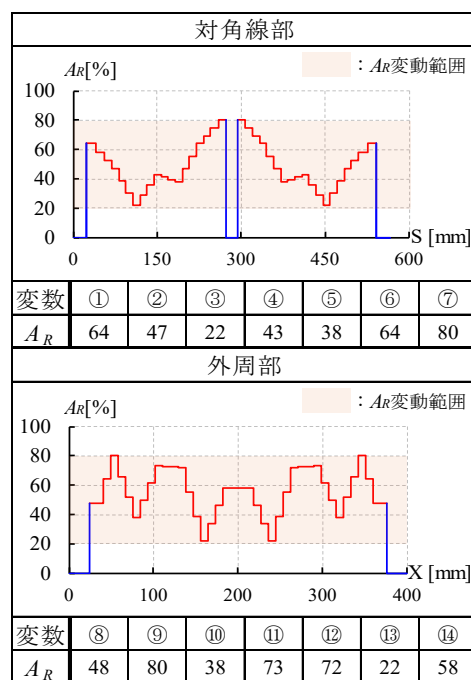
(実験調査によって得られた新しい知見)

本研究ではカーフベンディング技術を応用した新しいタイプの Active bending シェルの形成方法を提案し、解析的・実験的に検討を進めた。その結果、以下の知見を得た。

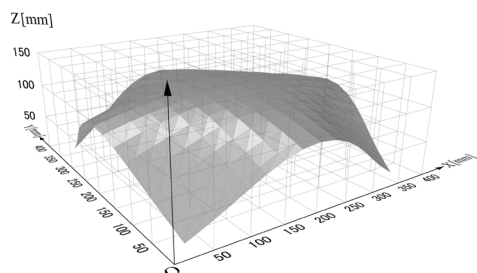
- ・シェル面を Main structure と Sub structure に分け、Main structure 部分のみ剛性を変化させることで全体形状を制御する手法を提案した。
- ・カーフパターンと剛性の関係を求め、線要素モデルに置換する手法を提案した。
- ・上記 2 つの手法は解析時間とコンピュータの不可を大幅に短縮することに繋がり、今回のようにパラメトリックに多くの解析を行う必要がある場合に有効である。
- ・形状固定処理後の面要素モデルに対して円著荷重を作用させて歪みエネルギーを評価し、これを目的関数とすることで、GA により最適解を求めることが出来る。
- ・提案した GA を用いた手法により、与えられた荷重に対して剛性の高いモデルを得られることを確認した。
- ・実際のモデルを用いたアーチ形状形成実験と計測により、本手法の有効性が実験的にも確認された。



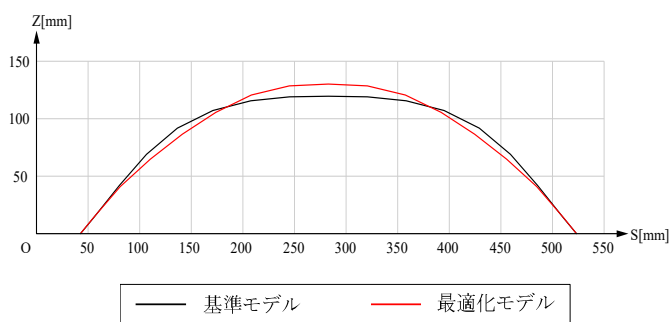
(a) 最適解のスリットパターン



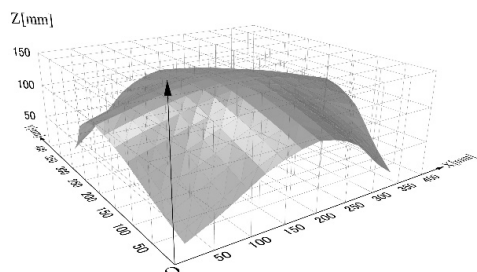
(b) 最適解の剛性配置



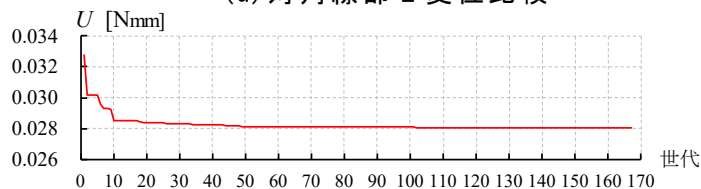
(c-1) 基準モデル形成形状



(d) 対角線部 Z 変位比較



(c-2) 最適化モデル形成形状



(e) 目的関数の推移

図 9 解析結果の例

(発 表 論 文)

1. 高井宏起、白羽健人、大木智史、小澤雄樹:GA を用いた Kerf Bending アーチの形状制御に関する基礎的研究、日本建築学会学術講演梗概集、2025 年 8 月 (投稿中)
2. 白羽健人、高井宏起、大木智史、小澤雄樹:カーブ加工された木質系パネルの構造性能に関する実験的検討、日本建築学会学術講演梗概集、2025 年 8 月 (投稿中)

・ 参考文献

- 1) 大木智史, 横田亨仁, 小澤雄樹: Kerf bending 技術を応用した Active bending アーチの形状制御手法, 日本建築学会技術報告集 第 74 号, pp.94-99, 2024 年 2 月
- 2) Tachi,T., et al.:Analysis and design of elastic materials formed using 2D repetitive slit pattern,Proceedings of the IASS, IASS Symposium 2015,2015.8
- 3) Symeonidou, I., et al.:Kerf Bending: A Genealogy Of Cutting Patterns For Single And Double Curvature, 7th International Conference on Geometry and Graphics MONGEOMETRIJA, 2020.9
- 4) 林 和希, 大崎 純: ベジエ曲線を用いたカーブベンディングのスリットパターンと梁要素による構造解析モデルの生成手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 第 2022 巻 pp.247-248,2022 年 7 月