

塑性化と座屈を考慮した耐力を評価指標とする  
薄板のエンボス模様の最適化手法の提案  
Proposal of Optimized Patterns on Embossed Sheet  
Regarding Plasticity and Buckling Strength

学籍番号 47-166744  
氏名 張 含露 (Zhang, Hanlu)  
指導教員 佐藤 淳 准教授

## 1. 序論

### 1.1 背景

構造形態の最適化において、グローバル（全体的）な形状をパラメータとした研究は多いが、ローカル（局所的）な形状に着目したものは少ない。例えば一定のスパンで二辺支持された一様な板の自重に対してひずみエネルギーを最小とする形状がアーチ状になることは広く知られている。さらに局所的に板に波型やくぼみの凹凸をつけることで（図 1）、剛性や座屈耐力といった構造性能を向上させられる可能性があるが、未解明な部分が多い。

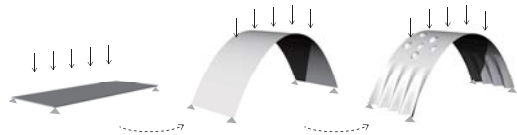


図 1 グローバルとローカルの最適化

本研究では、このローカルな形状最適化手法の構築を視野に、平板を対象としてエンボス加工を施す形状操作法を扱う。

### 1.2 既往研究

エンボスの模様について、円形<sup>[1]</sup>・正六角形<sup>[2]</sup>・卍形<sup>[3]</sup>など規則的な形状は研究されているが、より多様性のある模様が期待される。また曲げ剛性・材料強度・ひずみエネルギーなどを最適化の指標とした研究が多く見られるが、これらの指標は弾性域に留まることが多く、地震時を考慮した塑性域での検討は少ない。

### 1.3 目的

本研究では、平板に施されたエンボス模様と圧縮耐力の関係を明らかにすることを目的とするが、圧縮耐力の評価に材料の降伏と弾性座屈の両方を考慮している点が特徴的である。

エンボス模様のついた平板に圧縮力をかけると、材料の降伏が先行であれば、塑性化が徐々に進み終局に至り、座屈が先行であれば、多くの場合に耐力が急激に下がり、材料が破壊する。

本研究では降伏と座屈を考慮した圧縮耐力の評価法を提案し、それに基づき多種類のエンボス模様について一方向・二方向圧縮の解析を行う。これにより、局所形態の創生および力学の評価手法を構築し、エンボス模様と力学的特徴を関連付けることを目的とする。

## 2. 形状設定と解析法

### 2.1 エンボスの形状

エンボスの形をディンプル状とグルーブ状に分け、それぞれ面の模様と線の模様から生成すると考える。模様の外周に距離が  $r$  の場所から  $\sin$  カーブ状に滑らかに起伏し、模様の場所で最大起伏  $d$  に達する（図 2）。すなわち、

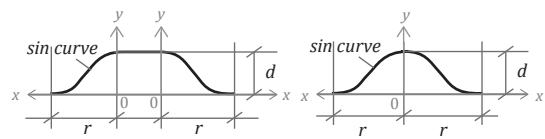


図 2 面の模様と線の模様のエンボス断面

板上の各点と与えられた模様との最短距離が  $x$ 、その点の起伏を  $y$  とすると、式 (1) になる。

$$y = \begin{cases} d, & x = 0 \\ \frac{d}{2} \left( \cos \frac{\pi x}{r} + 1 \right), & 0 < x \leq r \\ 0, & x > r \end{cases} \quad (1)$$

## 2.2 解析モデル

一方向圧縮では高さ 1500mm、幅 900mm、厚み 12mm の長方形鋼板、二方向圧縮では高さ 1200mm、幅 1200mm、厚み 12mm の正方形鋼板を用いる。またエンボスを施しても断面の厚みが変わらないものとする。エンボスに関わるパラメータ・材料情報を図 3 に、荷重・支持条件を図 4 に示す。

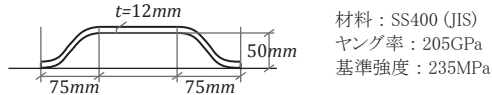


図 3 エンボスのパラメータと材料情報

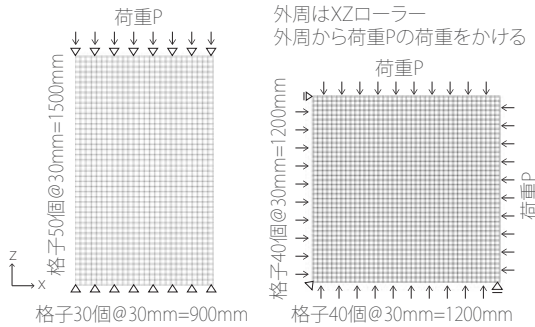


図 4 モデル化の情報

解析では、板を 30mm ピッチの正方形メッシュで分割し、線材としてモデル化する。平板の面外剛性に合わせるため、部材の有効幅を一方方向と二方向圧縮の場合にそれぞれピッチの 100% と 53.5% とする。

## 2.3 荷重増分解析と座屈固有値解析

本研究では短期の許容耐力を指標とし、各モデルに荷重増分解析と座屈解析を行う。

荷重増分解析について、モデルに各ステップに  $P$  の等分布荷重を増やし、板が全塑性に達するまで加力を続ける。モデルの端部の各点の軸方向変位の平均値をそのステップの変位とし、荷重変形曲線を描く。また除荷時の

永久ひずみが 0.2% になる荷重を、モデルの短期許容の降伏耐力  $P_y$  とする。

座屈解析について、それぞれのモデルに  $P$  の等分布荷重をかけ、線形座屈固有値解析を行う。座屈解析で得られた座屈固有値を  $\lambda$  とすれば、座屈による短期許容荷重が

$$P_b = \frac{\lambda * P}{2.17} * 1.5 \quad (2)$$

と計算される。ここで 2.17 と 1.5 はそれぞれ座屈設計・短期設計で使う安全率である<sup>[4]</sup>。

## 2.4 降伏と座屈との比較

横軸を降伏による許容耐力  $P_y$ 、縦軸を座屈による許容耐力  $P_b$  とし、それぞれの模様モデルをプロットする。また  $P_b = P_y$  の線を引き、線の右下にある模様は座屈が先行で、左上にある模様は降伏が先行である。また模様の点が右上に行くほど耐力が大きいといえる。

## 3. 解析結果

### 3.1 一方向圧縮

平板および様々な模様でエンボスを施した薄板に一方向圧縮の解析を行い、結果を図 6 にプロットした。また解析例を図 5 と表 1 に示す。

解析結果より、エンボスを施した薄板は平板より座屈耐力が上がるのが分かり、エンボスを施すことによる強度向上が確認できた。

エンボスの模様について、シンプルな面の模様が座屈先行の傾向があり、模様が複雑になるにつれ座屈耐力が上がり、徐々に降伏先行の領域に入る。またシンプルな縦線の模様は座屈・降伏または両方に強い傾向が見られた。

類似のエンボス模様の違いと耐力の関係については、模様を細長くする (a, b, g) と降伏・座屈とも強くなる。また、模様が互いにくい込む (b, c)、または上下連続な直線の模様を描く (f, g) と座屈に強くなり、横の線を減らす (d, e) (f, g) と降伏に強くなると分かった。

### 3.2 二方向圧縮

次に、エンボスを施した薄板に二方向圧縮の解析を行い、その結果を図8に、代表例を図7・表2に示す。

解析結果より、エンボスを施す薄板は平板より座屈耐力が上がることを確認できた。

エンボスの模様について、一方向圧縮と同様に全体的にシンプルな面の模様が座屈先行で、模様が複雑になるにつれ座屈に強く、降伏に弱くなる傾向が見られた。一方、一方向圧縮と違い、単純な線の模様は全体的に降伏耐力が低く、十字型に近い模様は最も座屈耐

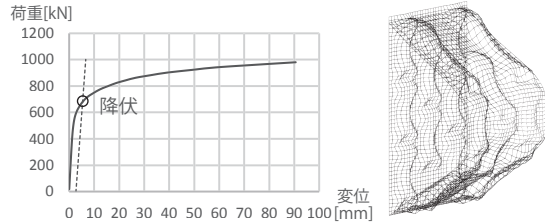


図5 一方向圧縮の荷重変形曲線と座屈モード (模様c)

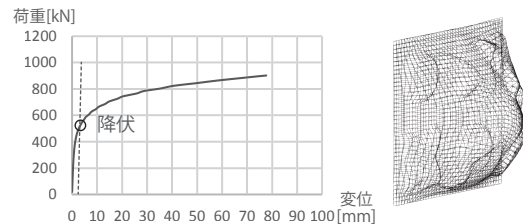


図7 二方向圧縮の荷重変形曲線と座屈モード (模様C)

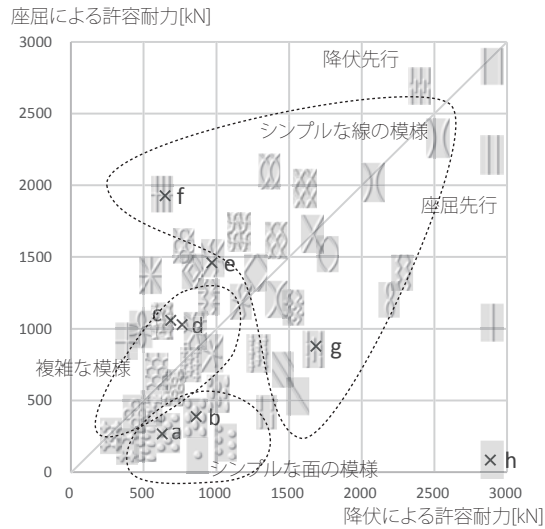


図6 一方向圧縮のエンボス模様の耐力分布

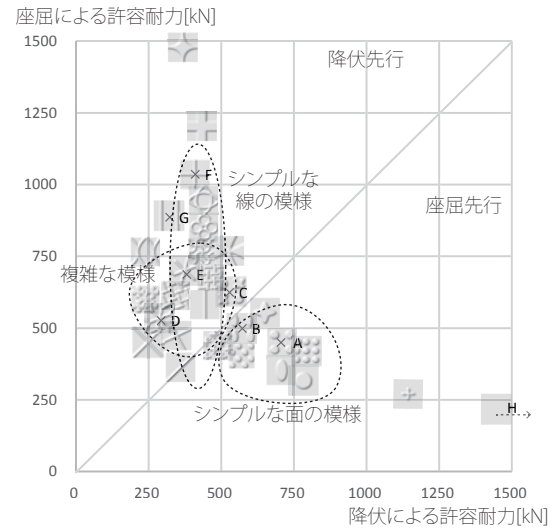


図8 二方向圧縮のエンボス模様の耐力分布

表1 一方向圧縮のエンボス模様の例

	シンプルな面の模様		複雑な線・面の模様		シンプルな線の模様			平板
記号	a	b	c	d	e	f	g	h
模様								
降伏による許容耐力	627kN	862kN	686kN	764kN	970kN	647kN	1682kN	2883kN
座屈による許容耐力	268kN	388kN	1059kN	1028kN	1460kN	1927kN	878kN	83kN

表2 二方向圧縮のエンボス模様の例

	シンプルな面の模様		複雑な面・線の模様		シンプルな線の模様			平板
記号	A	B	C	D	E	F	G	H
模様								
降伏による許容耐力	706kN	573kN	529kN	294kN	382kN	412kN	323kN	3726kN
座屈による許容耐力	450kN	489kN	624kN	526kN	687kN	1035kN	886kN	222kN

力が強かった。一方向圧縮のように降伏・座屈とも強い模様は見つからなかった。

類似のエンボス模様の違いと耐力の関係については、線模様では斜めの線よりも縦横のほうが降伏・座屈とも強くなる傾向がある(D, E, F)。また、面模様では細長くする(A, B, G)・くい込みを増やす(A, C)・縦と横二方向に直線を描く(F, G)ほうが座屈耐力が上がるが、多くの場合には降伏耐力の低下を伴う傾向が見られた。

## 5. 実験

### 5.1 実験概要

解析の妥当性を検討するため、薄板にエンボスを施し、長手方向に圧縮実験を行った。

塑性能力・加工難易度などを考慮し、試験体には 400\*240\*0.3mm の銅板を用いて、「花模様」「月模様」を一体ずつ製作し、両端固定支持で上から一様分布荷重をかけた。試験体の詳細を図 9 に示す。

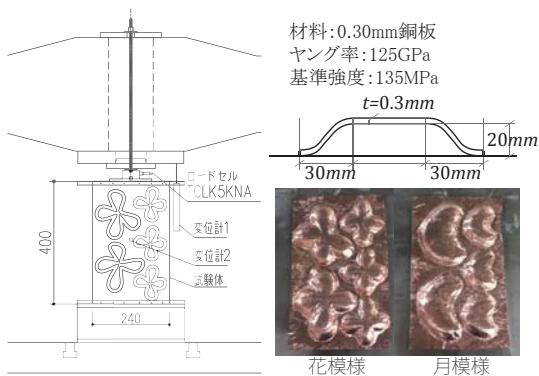


図 9 試験体情報

### 5.2 実験結果

花模様は最大耐力 0.0826kN、月模様は最大耐力 0.126kN に達した。また、月模様では座屈後に強度が下がる現象が見られた。

### 5.3 解析結果

実験で使う試験体に 3D スキャンを行い、モデルを作成し、解析を行った。

荷重増分解析の荷重変形曲線を実験と比べると、いずれも実験値は解析値の 40% 程度の

曲線を描くことが分かった。そこで座屈解析結果を 40% にした値を実験の面外変形の荷重変形曲線に照らし合わせてみると、概ね座屈荷重と捕えてよい値と見ることができる(図 10)。

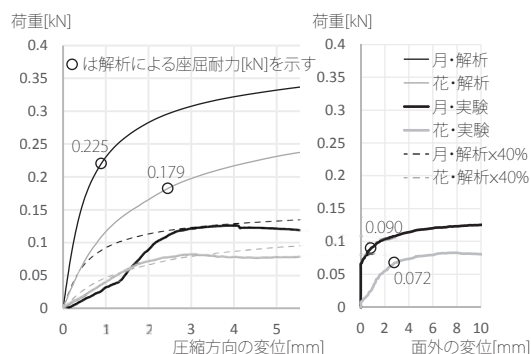


図 10 実験と解析の荷重変形曲線

### 5.4 考察

降伏・座屈とも解析値の 40% 前後が実験値に近い結果となった。事前に行った解析モデルについて、部材の有効幅を 100% にしていたが、40% とすることが望ましいことが分かった。降伏と座屈のどちらについてもこの倍率が同じ値を使えるので、3章で得た模様のグラフ上での分布の様子は変わらない。ただし、この割合は形状によって異なる可能性があることが今後の課題である。

## 6. 結論

本研究ではエンボスを施した薄板の圧縮耐力の降伏と座屈を考慮した評価手法を提案し、それに基づき一方向圧縮と二方向圧縮時のエンボス模様と力学的特徴の関係を探り、また実験で解析との違いについて考察した。

今後の展望として、フラクタルな入れ子状のエンボス模様、モデルの有効幅の再検討、機械学習による模様特徴の分析などが考えられる。

#### 主要参考文献

- 1 奥戸行一郎ほか.(2000). 超軽量・高剛性の建築構造用パネル: 成形性に優れた薄鋼板をエンボス加工したパネル構造材(構造). 日本建築学会近畿支部研究報告集. 構造系, (40), 257-260.
- 2 新谷眞人ほか.(2004). アルミニウム合金を用いたハニカムとサンドイッチパネル構造の設計. 日本建築学会技術報告集, 10(19), 135-140.
- 3 高橋昌也.(2011). 等方的なシェル構造の補剛模様の開発. 日本機械学会論文集 A 編, 77(781), 1410-1416.
- 4 日本建築学会.(2005). 鋼構造設計規準. 1970 年制定.