

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻
2017 年度
修士論文

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

2018 年 1 月 22 日提出
指導教員 佐藤淳 准教授

張 含露
Hanlu ZHANG

目次

第1章 序

1.1.	研究背景	5
1.2.	既往研究	7
1.3.	研究目的	8
1.4.	論文構成	9

第2章 手法の提案

2.1.	エンボスのアルゴリズム	11
2.1.1.	線の模様から形を生成する手法	11
2.1.2.	面の模様から形を生成する手法	12
2.2.	板の情報とモデル化の仕方	13
2.3.	解析の手法	14
2.3.1.	荷重増分解析	14
2.3.2.	座屈解析	16
2.4.	降伏と座屈の比較	17
2.5.	小結	18

第3章 一方向圧縮

3.1.	パラメータの設定	20
3.2.	平板の解析	20
3.3.	エンボス模様の解析	21
3.3.1.	カテゴリー I	23
3.3.2.	カテゴリー II	28
3.3.3.	カテゴリー III	31
3.4.	エンボス模様と力学の関係	33
3.5.	考察	34

第4章 二方向圧縮

4.1.	パラメータの設定	36
4.1.1.	板の情報	36
4.1.2.	モデル化	37
4.1.3.	解析と評価の仕方	38
4.2.	平板の解析	39
4.3.	エンボス模様の解析	40
4.3.1.	カテゴリー I	42

4.3.2.	カテゴリー II	46
4.3.3.	カテゴリー III	48
4.4.	エンボス模様と力学の関係	51
4.5.	考察	52
第 5 章 実験		
5.1.	実験概要	54
5.1.1.	実験目的	54
5.1.2.	パラメータの設定	54
5.2.	実験方法	55
5.2.1.	試験体の製作	55
5.2.2.	試験体の 3D スキャン	56
5.2.3.	セットアップ	58
5.2.4.	実験様子	61
5.3.	実験結果	62
5.4.	試験体の解析	65
5.4.1.	解析モデル	65
5.4.2.	解析結果	67
5.5.	考察	68
5.5.1.	変形モード	68
5.5.2.	座屈・降伏耐力	69
5.5.3.	解析の検討	70
第 6 章 結		
6.1.	結論	72
6.2.	今後の展望	73

第 1 章
序

1.1 研究背景

近年計算機の発展に従って曲面が設計しやすくなり、形態の最適化も追求されつつある。構造形態の最適化を考える時、グローバルとローカルという二つの視点から最適化が考えられる。例として、グローバル的に平らなスラブよりアーチのほうが構造的に有利であるが、さらにローカル的に、アーチの麓に波を打たせてくぼみをつけることで、剛性や座屈耐力といった構造性能を向上させられることができる。本研究は後者のローカルな形状最適化手法の構築を視野に入れる。

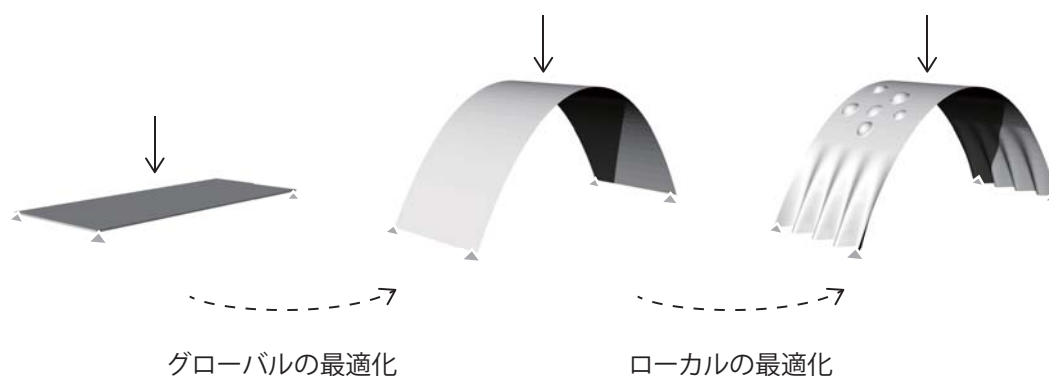


図 1.1 グローバルとローカルの最適化

局所の最適化を考える時、滑らかな面にしわやディンプルなどをかけることが考えられる。薄板に凹凸させる方の面外剛性が上がることは経験的に知られている。自然界には葉脈やトンボの羽など、くぼみによって構造を強くする形態がよく見られる。建築においても材料の軽減を図るために凹凸をつけた形の構築物が提案されている（図 1.2）。このように、板にエンボスを施すことによってより構造のよい形態ができるといえる。

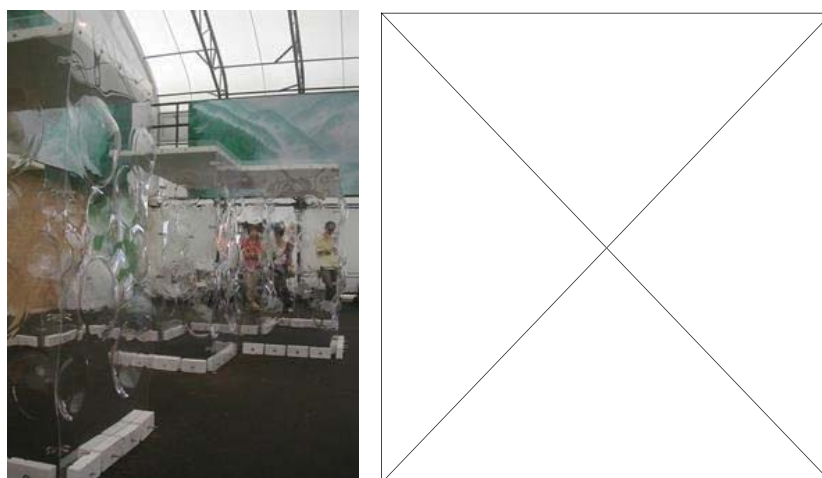


図 1.2 エンボスを施す構築物の事例^{[1][2]}

本研究では、エンボスを施した薄板の局所的な構造最適化手法を提案する。局所形態の生成手法および力学の評価方法を構築し、エンボス模様を力学的な傾向を把握することを目的とする。エンボス模様と力学の特徴を関連付けることによって、局所的な形態操作の方針を構築し、構造の立場で設計意図に適する形態の操作法を示し、または構造の弱い部分につけるべきエンボス模様を提示することも可能となる。



図 1.3 エンボスを施すことで構造を強くする

1.2 既往研究

エンボスの力学挙動に関する既往研究について、千鳥配置をした円形模様が最も知られていて、研究されている。奥戸ら^[3]がコップ状凹みを持つ薄鋼板について、実験と弾性域内の有限要素法解析を行い、エンボスパネルが比剛性と比強度を有することを検証した。また Hassan ら^[4]は同心円状のエンボス模様についての力学性質を調べた。

平面に充填できる六角形を対象とするエンボスの研究も行われた。松居ら^[5]が六角ディンプルプレートの成形特性および曲げ強度と剛性について調べ、新谷ら^[6]がハニカムとサンドイッチパネルを建築構造設計へ応用することを考案した。同様にタイリングからの発想で、高橋ら^[7]は波板形状を一部回転したX型・I型・卍字型の模様を提案し、角度を変えてFEM解析をし、板の等方性について調べた。また酒巻ら^[8]が折り紙の観点から面外剛性向上のサンドイッチ板を創成した。



図 1.4 既往研究で扱った模様の例^[9]

エンボス模様の規則性を打破し、清本ら^[10]が板にランダムにしわを与えるときに、平板よりも面外曲げ剛性と耐力が上昇することを実験と数値解析で確認した。Narain ら^[11]が紙をくしゃくしゃにする力学アルゴリズムについて研究した。

倣生学の視点から、小林ら^[12]は葉の脈系について有限要素法で葉の変形解析を行い、平野ら^[13]はさらに建築構造部への使用を検討した。工藤ら^[14]がトンボの羽の幾何学の特徴を調べ、建築形態への転用について考察した。

以上に挙げた既往研究をまとめれば、エンボス模様について、多くの研究は規則のある模様を扱い、より多様性のある模様が期待される。また一種類のエンボス模様に絞った研究が多数あるが、異なる形をしたエンボス模様の間での比較が少ない。力学挙動の評価法に関して、曲げ剛性・強度・ひずみエネルギーなどを指標とすることがあるが、弾性範囲に留まることが多く、地震時を配慮した塑性領域での検討が少ない。

1.3 研究目的

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。

薄板の長手方向に圧縮力をかけるとき降伏もしくは座屈が起こりうる。降伏とは材料が弾性域から塑性域に入り、永久ひずみが残る現象である。座屈とは、圧縮力で部材が横にはみだす現象である。

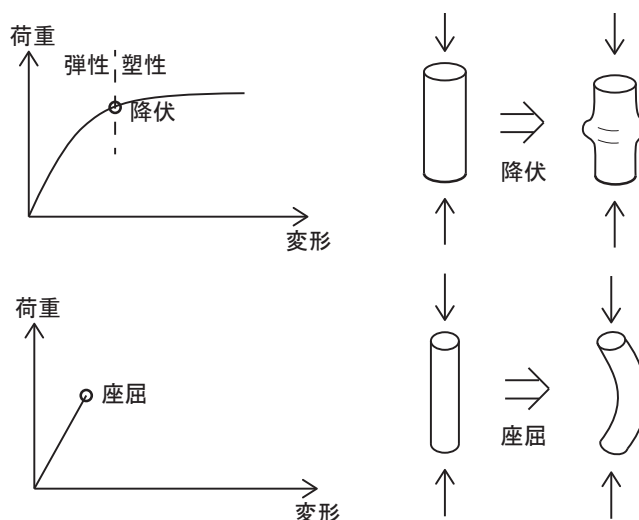


図 1.5 降伏と座屈

降伏と座屈耐力を比較し、降伏が先行であれば、塑性化がだんだん進み終局にいたる。座屈が先行であると、多くの場合は耐力が急激に下がり材料が破壊する。どちらかが良いということではなく、降伏先行型は変形能力が大きい構造として、座屈先行型は変形能力の小さい構造として設計に応用する。なお、本研究では塑性化が進行した際に起きた塑性座屈、あるいは座屈にもかかわらず耐力が激減しない座屈後挙動については無視するものとする。

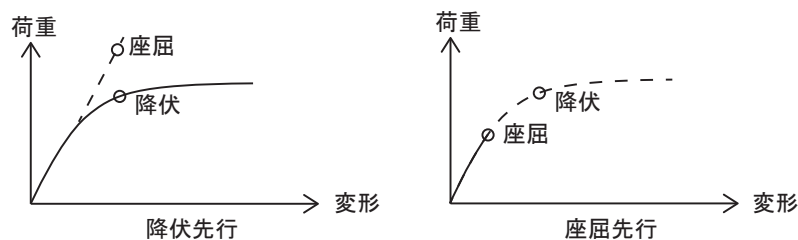


図 1.6 降伏先行と座屈先行

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の特徴を関連付けることを目的とする。

1.4 論文構成

本論文の構成を以下に示す。

1 章ではエンボスを施すによって薄板が強度向上できることを提示し、そして降伏および座屈の概念を踏まえて、両方を指標とすることでエンボス模様の力学特徴を探るという本研究の目的を示す。

2 章では、エンボス模様を評価するために提案した手法を述べる。エンボスを生成するアルゴリズム、解析モデルの作成方法、塑性化を調べるための増分解析と座屈を調べる座屈解析の手法、および解析で得られたデータの評価法について説明する。

3 章では、2 章の手法に基づき長方形鋼板に様々なエンボス模様を作成し、長手方向に圧縮する解析を行う。解析から模様の耐力による分布図を作り、模様の特徴と降伏・座屈強度の関係について論述する。

4 章では、同様に 2 章の手法に基づき正方形鋼板に様々なエンボス模様を作成し、2 方向に圧縮する解析を行う。解析結果から模様と強度の関係を調べ、また一方向圧縮時のエンボスの特徴と比べる。

5 章では、解析手法の妥当性を調べるため、銅板で 2 体のエンボス模様を試作し、一方向圧縮の実験を行う。また実験の結果とモデルの解析結果を比べて考察する。

6 章では本研究をまとめて、今後の展望を示す。

第2章 手法の提案

本研究では模様が挙げられたときに、模様からエンボスの形を作り、塑性化と座屈の解析を行い、両方の結果に基づいてその模様の力学挙動を評価することを提案した。本章ではこの一連のアルゴリズムについて説明を行う。なお、本章で挙げたパラメータは3章で扱う「一方向圧縮」のものであり、4章で論議する「二方向圧縮」についての設定は4.1節に挙げる。

2.1 エンボスのアルゴリズム

エンボスの形をグルーブ状とディンプル状に分け、それぞれ線の模様と面の模様から生成すると考える。

2.1.1 線の模様から形を生成する手法

線の模様が与えられたとき、線に沿って管状のような隆起を作るイメージでエンボスを施す。具体的に、次の考え方にに基づき、板を起伏させる。

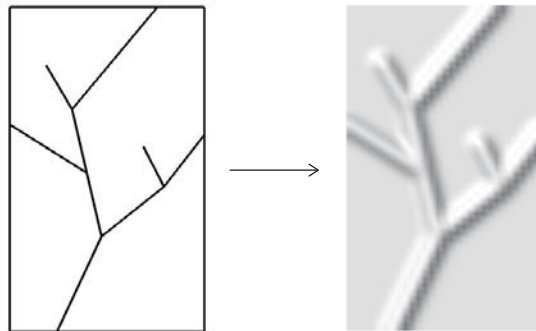


図 2.1 線の模様からエンボスを施す

まず線が板に影響を及ぼす幅を決める。線との最短距離が r 以内の領域だけ起伏させるとする。起伏の最大値を d とし、起伏のない領域からだんだん最大起伏 d に達するプロセスを考える。もしエンボスの断面が直線または円弧の形であれば、板の曲率が急激に変化する箇所ができ、応力集中で強度が落ちやすい。したがって滑らかな上昇が望ましく、本研究では \sin カーブにしたがって起伏させるとする。

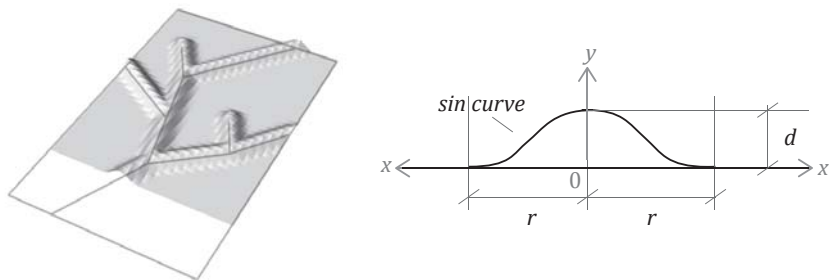


図 2.2 エンボスの断面

以上を整理すると、板上の各点と与えられた線との最短距離が x 、その点の起伏を y とすると、

$$y = \begin{cases} \frac{d}{2} \left(\cos \frac{\pi x}{r} + 1 \right), & 0 \leq x \leq r \\ 0, & x > r \end{cases} \quad (\text{式 2.1})$$

となる。なお、1 点が複数の線の起伏領域に入っている場合に、その起伏がそれぞれの起伏のうち最大なものとする。

2.1.2 面の模様から形を生成する手法

面の模様が与えられたとき、面を押すようなイメージで形を生成する。このときも線の模様の場合と同様に、外周から \sin カーブにそって起伏し、面の模様で囲まれた領域に最大起伏に達する。

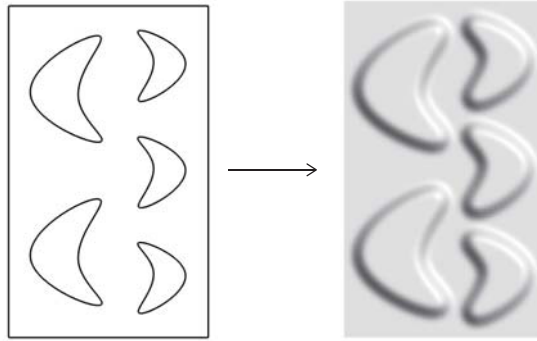


図 2.3 面の模様でエンボスを施す

具体的に、面の輪郭線で囲まれてない領域において、各点と面の稜線との最短距離を x とすると、 x が一定のオフセット距離 r 以内であれば、 \sin カーブの形にそって起伏する。また面の輪郭線で囲まれた領域は常に最大起伏 d を維持する。

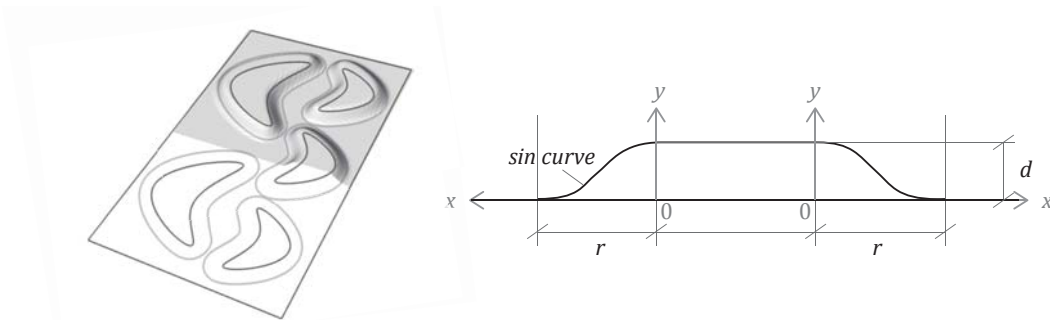


図 2.4 エンボスの断面

数式で表すと、面で囲まれた各点の起伏 y が、

$$y = \begin{cases} d, & x = 0 \\ \frac{d}{2} \left(\cos \frac{\pi x}{r} + 1 \right), & 0 < x \leq r \\ 0, & x > r \end{cases} \quad (\text{式 2.2})$$

となる。このときも線の模様と同様に、1 点が複数の起伏領域に入っている場合に、その起伏がそれぞれの起伏のうち最大なものとする。

2.2 板の情報とモデル化の仕方

一方向圧縮の解析では、高さ 1500mm、幅 900mm、厚み 12mm の長方形鋼板にそれぞれの模様を施したものとする。鋼板は汎用の SS400 (JIS) を仮定し、材料性質を表 2.5 に示す。板を凹凸させても各断面の厚みが変わらないものとする。板の上下両端をピン支持とし、自重を無視し、荷重は上からかけた等分布荷重 P のみがあると想定する。

表 2.5 材料情報

ヤング率	ポアソン比	基準強度
205GPa	0.3333	235MPa

モデル化の仕方について、面を正方形メッシュで分割した線材としてモデル化する。線材でモデル化する理由は、線材で解析することでモデルの剛性マトリクスができて、今後エンボス模様に関するほかの挙動を調べるときにも役立つと考えられる。また線材のほうは部材の応力がより明快であり、実務でも面を線材としてモデル化することが多くあるためである。

解析は、図 2.6 のように正方形メッシュのピッチを 30mm とし、縦 50 マス横 30 マスのメッシュとなる。線材の有効幅を決めるときに、平板を圧縮する場合に得られた解析値が計算の理論値に合わせるように、有効幅をピッチの 30mm とした。このときはモデルの横材が応力を負担しないことと同じである。

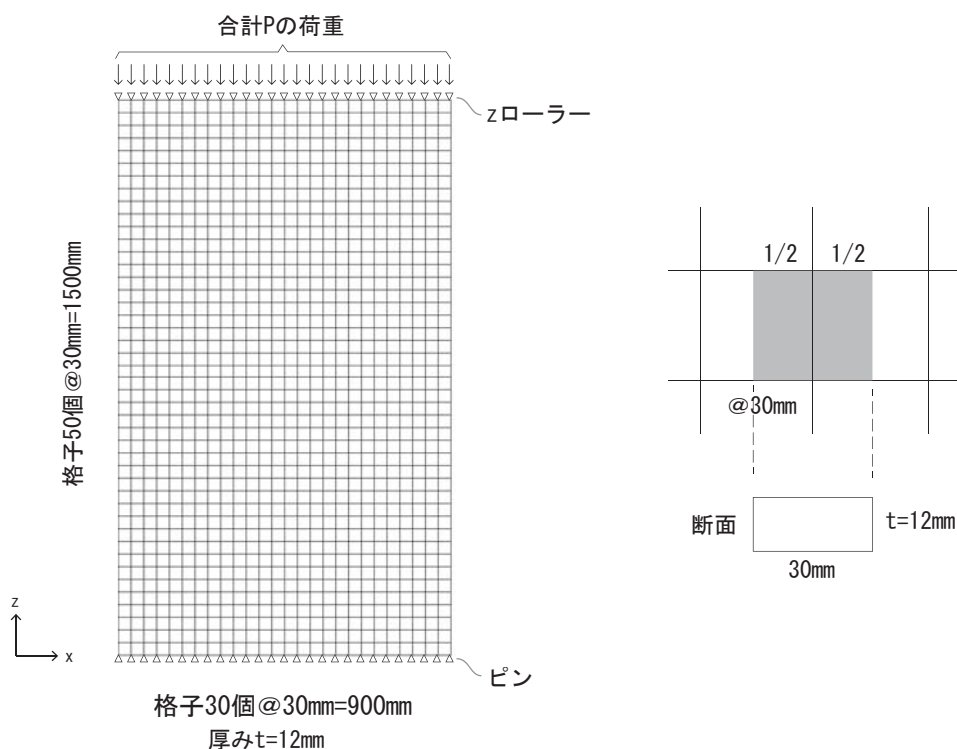


図 2.6 モデル化に関する情報

2.3 解析の手法

本研究では圧縮時の短期許容耐力を最適化の指標とする。薄板に圧縮力をかけるとき、構造解析ソフト Hogan^[15] を使用し、各モデルに荷重増分解析と座屈固有値解析を行い、両者の結果をもとに板の剛性を評価する。

2.3.1 荷重増分解析

板の圧縮耐力を調べるため、垂直方向に加力し荷重増分解析を行う。

(1) 降伏曲面の設定

軸力や曲げモーメントなどの応力による降伏を判断するために、次の式で降伏曲面を決める。

$$\left(\frac{N}{N_{max}}\right)^{1.5} + \left(\frac{Q_x}{Q_{xmax}}\right)^{1.5} + \left(\frac{Q_y}{Q_{ymax}}\right)^{1.5} + \left(\frac{M_x}{M_{xmax}}\right)^{1.5} + \left(\frac{M_y}{M_{ymax}}\right)^{1.5} + \left(\frac{M_z}{M_{zmax}}\right)^{1.5} = 0.95^{1.5} \quad (\text{式 2.3})$$

$$N_{max} = \sigma_y * A \quad (\text{式 2.4})$$

$$Q_{xmax} = Q_{ymax} = \frac{\sigma_y * A}{1.5 * \sqrt{3}} \quad (\text{式 2.5})$$

$$M_{xmax} = \sigma_y * Z_{px} \quad (\text{式 2.6})$$

$$M_{ymax} = \sigma_y * Z_{py} \quad (\text{式 2.7})$$

$$M_{zmax} = \frac{1}{2}(M_{xmax} + M_{ymax}) \quad (\text{式 2.8})$$

ここで $N, Q_x, Q_y, M_x, M_y, M_z$ がある荷重で断面の応力を表している。式 2.3 の左辺が右辺より大きくなった時点で断面が降伏し、塑性ヒンジができると判断する。

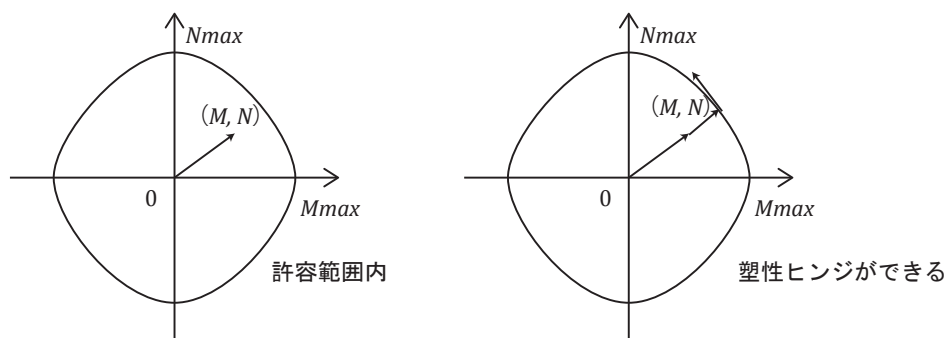


図 2.7 降伏曲面

(2) 加力

モデルに各ステップにPの等分布荷重を増やし、十分な塑性ヒンジができるまで加力を続ける。

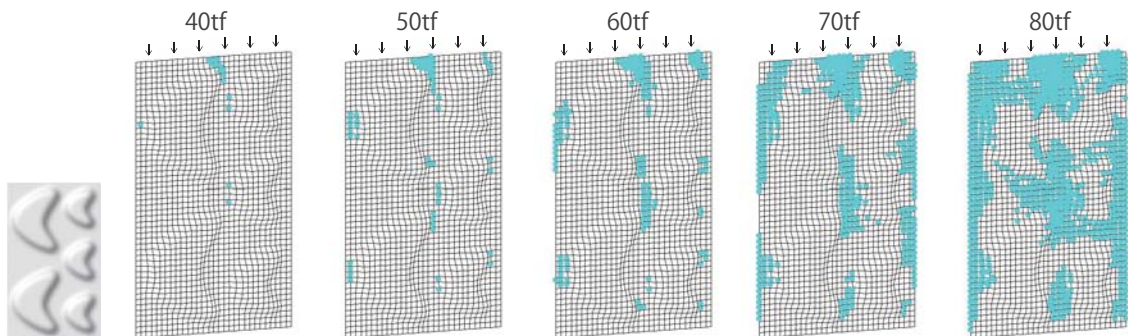


図 2.8 荷重増分解析における塑性ヒンジ図の例

(3) 荷重変形曲線

解析で得られたデータに基づき、荷重変形曲線を描く。変形をモデルの最上端の各点の垂直変位の平均値とし、各ステップにおける変形と荷重をプロットする。

(4) 終局の決め方

荷重変形曲線からモデルの圧縮耐力を読み取る。明確な降伏点を示さないため、除荷時の永久ひずみが0.2%になる応力（0.2%耐力）をモデルの降伏による短期許容耐力とする。

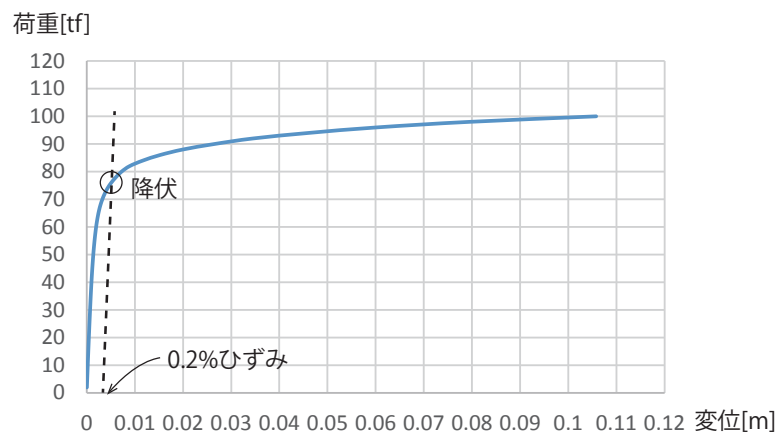


図 2.9 荷重変形曲線の例

2.3.2 座屈解析

それぞれのモデルに上から合計 P の等分布荷重をかけ、幾何剛性マトリックスを作成し、線形座屈解析を行う。図 2.10 はモデルに座屈解析を行う際にできた座屈モードを示す。

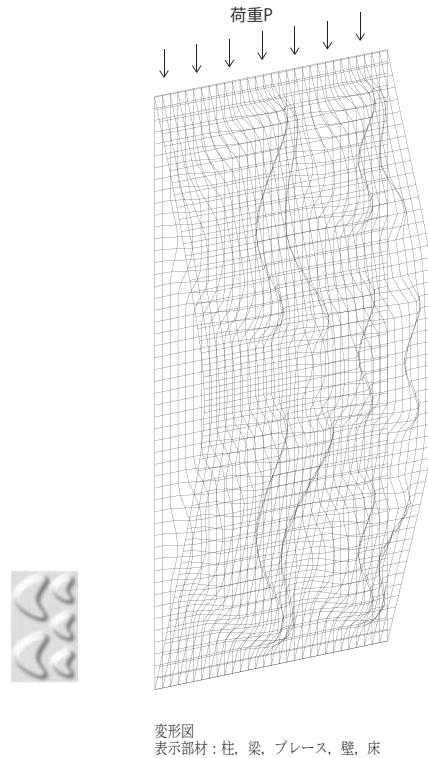


図 2.10 座屈解析の例

座屈解析で得られた座屈固有値を λ とすれば、モデルの座屈荷重が $\lambda * P$ となる。また、鋼構造設計規準^[16]により、弾性座屈による許容圧縮応力度の安全率が 2.17 で、短期設計の安全率が 1.5 であるため、座屈による短期許容荷重が、座屈荷重を 2.17 で割り、さらに 1.5 倍を乗じたものである。すなわち座屈による許容耐力が、

$$P_b = \frac{\lambda * P}{2.17} * 1.5 \quad (\text{式 2.9})$$

となる。

2.4 降伏と座屈との比較

図 2.11 に示すように、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、縦軸の座屈時の耐力によって決まる。線の左上にある模様は降伏が先行で、横軸の降伏の耐力によって決まる。模様の点が右上に行くほど耐力が大きいといえる。

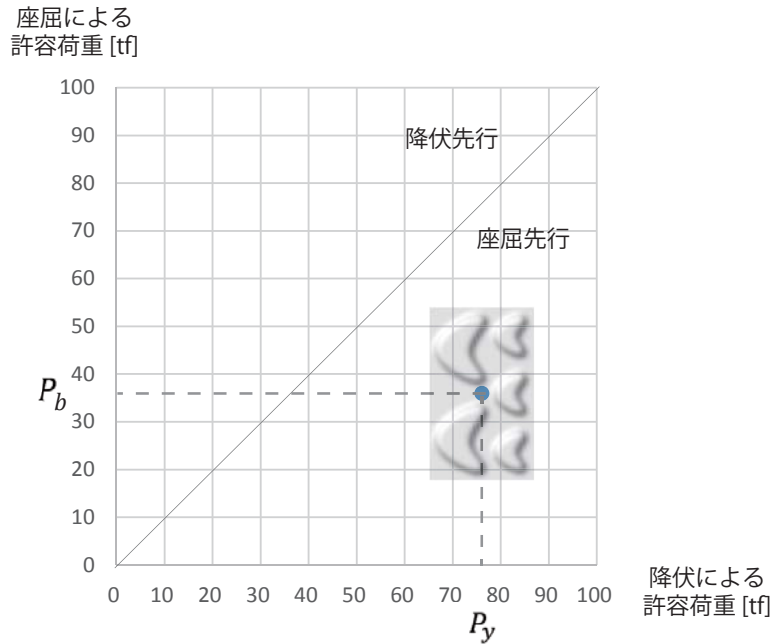


図 2.11 模様のプロット

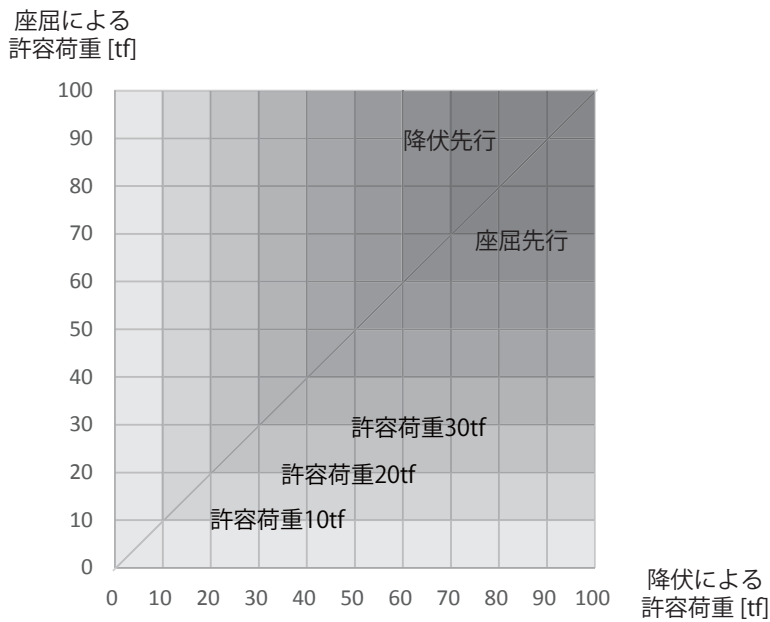


図 2.12 グラフから耐力を読み取る

2.5 小結

本章では、板を一方向に圧縮することを例として、エンボス模様の生成アルゴリズムを構築し、板のモデル化の手法を検討し、増分解析と座屈解析から求めた荷重を評価する方法を提案した。

このことにより、多様なエンボス模様を創生することが可能となり、また圧縮力を受ける場合に、模様が降伏するか座屈するかに関する挙動が分かるようになる。本章で提案した評価手法に基づき、様々なエンボス模様を比較し、より設計意図に適するエンボス模様を提示することが可能となる。

第3章 一方向圧縮

本章では前章で提案した評価手法に基づき、平板および様々な模様でエンボスをかけた薄板について一方向圧縮時の解析を行い、模様と降伏・座屈耐力との関係を調べる。

3.1 パラメータの設定

エンボスのパラメータについて、最大起伏 $d=50\text{mm}$ 、起伏発生時の線との距離 $r=75\text{mm}$ を一定とし、平板および様々な模様からエンボスを施したものに対して解析を行った。

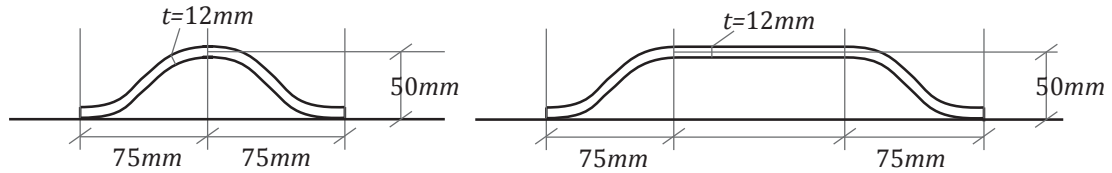


図 3.1 エンボスのパラメータ

3.2 平板の解析

まず模様をかけない平らな板に対して解析し、その結果を図 3.2 に示す。平板の降伏による許容耐力が 294.2tf であり、座屈の許容耐力が 8.52tf である。これは、平板に対して座屈が先行で、 8.52tf まで耐えられると意味する。

平板の解析結果を基準とし、模様がついたときの降伏と座屈の許容耐力をこれと比べる。板に模様を施すと、圧縮耐力が落ちるにもかかわらず、座屈耐力が上がることを期待する。これによって、全体的に耐えられる荷重が上回り、構造形態の最適化に繋がる。

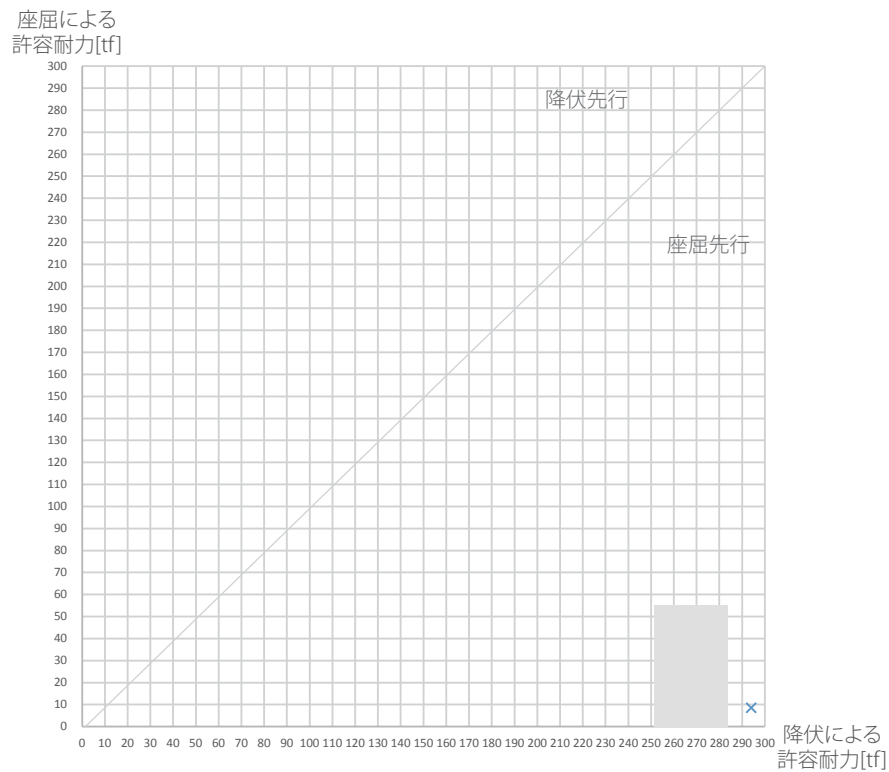


図 3.2 平板の解析

3.3 エンボス模様解析

様々な模様について解析を行い、耐力を図 3.3 にプロットした。また、付録に解析したすべての模様と耐力が載せてある。

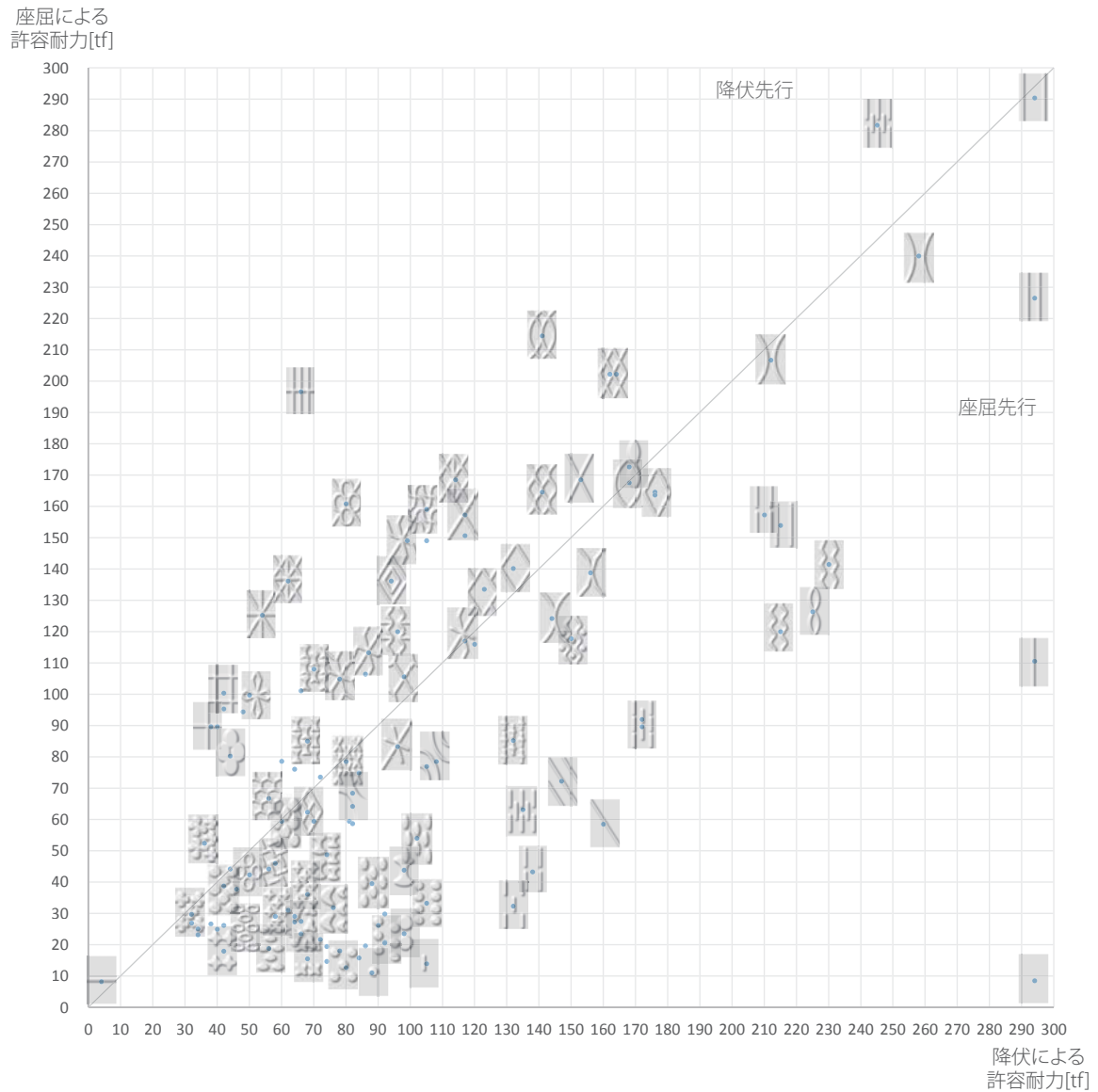


図 3.3 エンボス模様の解析

プロットした結果より、本論文では模様の種類が大体3つのカテゴリーに分けられてその分布について論述したい。

カテゴリーIは、比較的単純な面の模様からエンボスを施したのから構成されている。このカテゴリーの模様はグラフの右下にプロットされたものが多く、ある程度降伏に強いかかわらず、座屈に弱く、全体的に座屈先行の傾向がある。

カテゴリーIIは、比較的複雑な形が板の全域に分布する模様である。このときの板は、面の模様からエンボス化したものか、線の模様からなったものか曖昧になり、面の模様を表裏ひっくり返すと線の模様にも捉えられる。このカテゴリーの模様は、グラフの左下から中央にあり、全体的にカテゴリーIの模様より座屈耐力が上がり、また降伏先行の模様もよく見られる。

カテゴリーIIIは、比較的単純な縦の線の模様からエンボスを施したものである。このカテゴリーの模様は、グラフの右・上・右上にあることが多く、カテゴリーI・IIより、降伏・座屈または両方の強度がはるかに超える特徴がある。

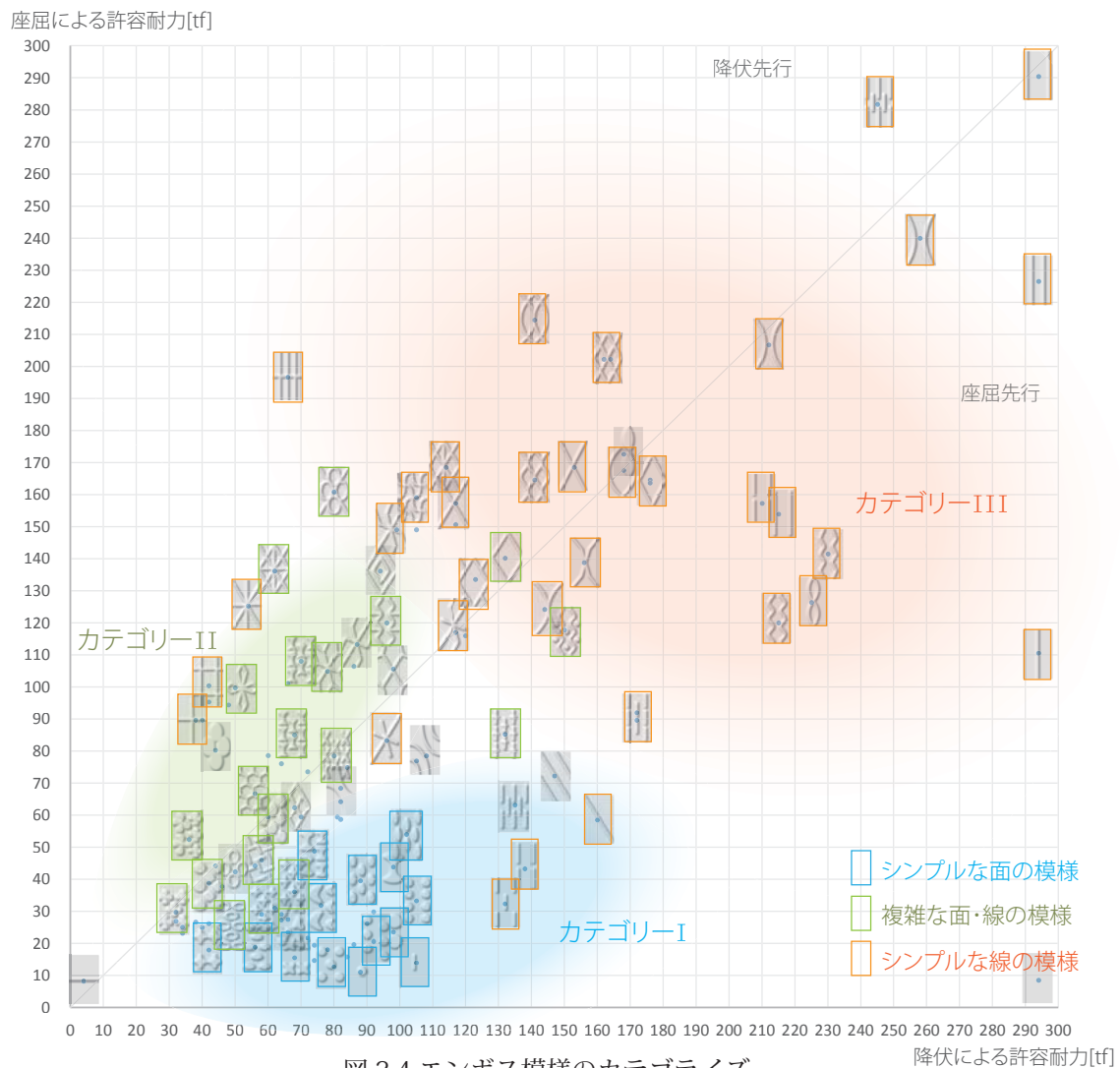


図 3.4 エンボス模様のカテゴリサイズ

3.3.1 カテゴリーI

カテゴリーIは、比較的単純な図形を規則的に配列する模様であり、降伏より座屈先行のパターンが多く見られる。ここではカテゴリーIの模様について、配列の特徴と図形の特徴を分けて論述する。

(1) 図形の配列について、ある程度密に模様をつけなければ座屈耐力が上がらない傾向がある。これは模様のない平らな領域が座屈に特に弱いと考えられる。一方に、配列の図形を増やすことにつれ、降伏耐力が落ちることがある。これは形の起伏が多くなるにつれ、起伏の箇所に曲げによる塑性ヒンジができやすいためだと考えられる。

図 3.5 は 1 つの大きな図形の模様と、同じ図形を縮小して何個か並べる模様を比べたものである。配置の仕方にもよるが、板全面にエンボスをつけたほうが座屈によいが、起伏が細かくなり、降伏強度が落ちることを示す。図 3.6 は模様 172 と模様 127 塑性ヒンジ図であり、模様 127 のほうはたくさんの部位でヒンジができることが分かる。

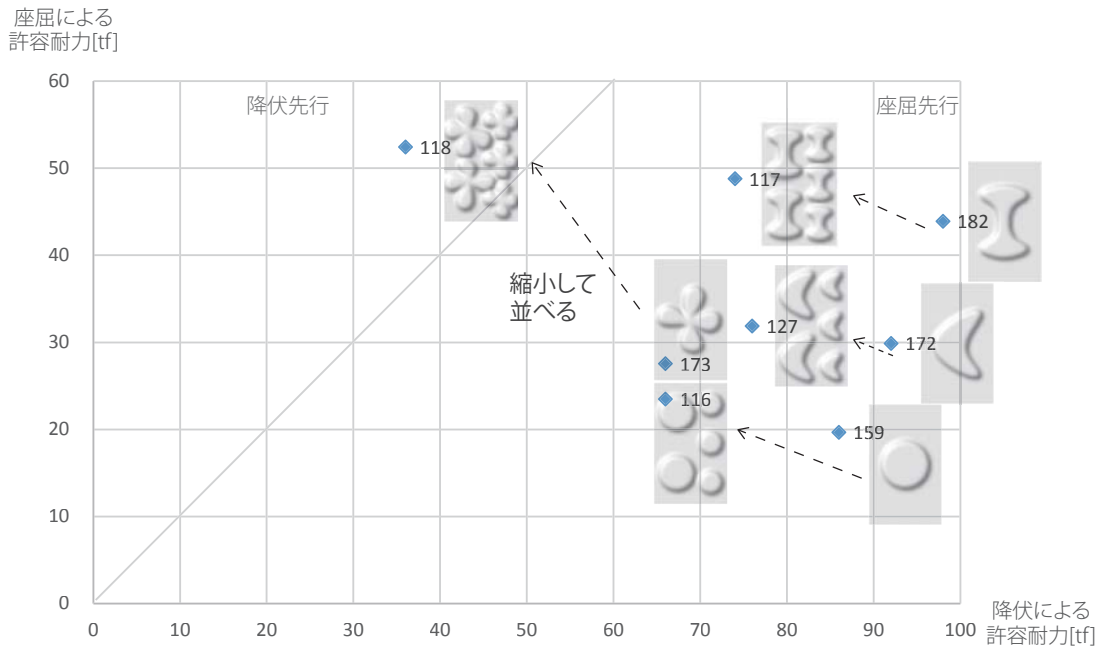


図 3.5 模様を縮小して並べる場合の分布

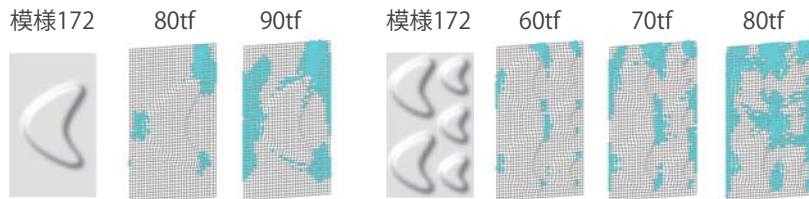


図 3.6 模様を縮小して並べる場合の塑性ヒンジ図

図 3.7 は図形を 4 個の整列配置から 5 個の千鳥配置に変えるときの挙動を示す。図 3.8 は模様 133 と模様 134 の座屈モードを示す。千鳥配置のほうが、模様中央に平らな部分がなくなり、座屈に強くなると考えられる。

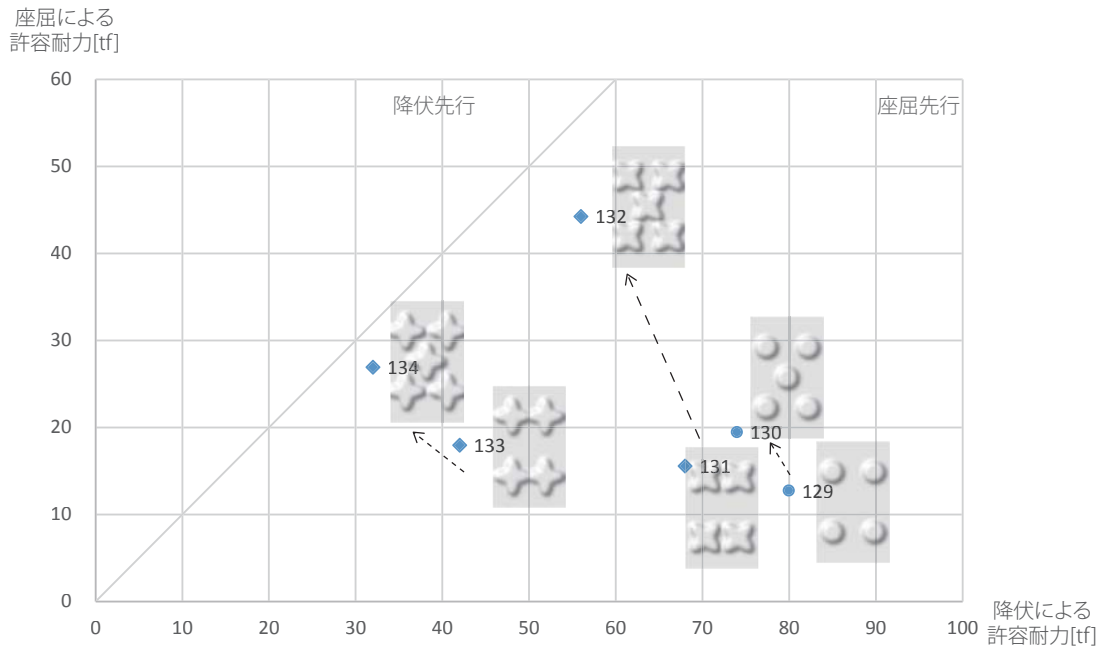


図 3.7 整列配置と千鳥配置の模様の分布

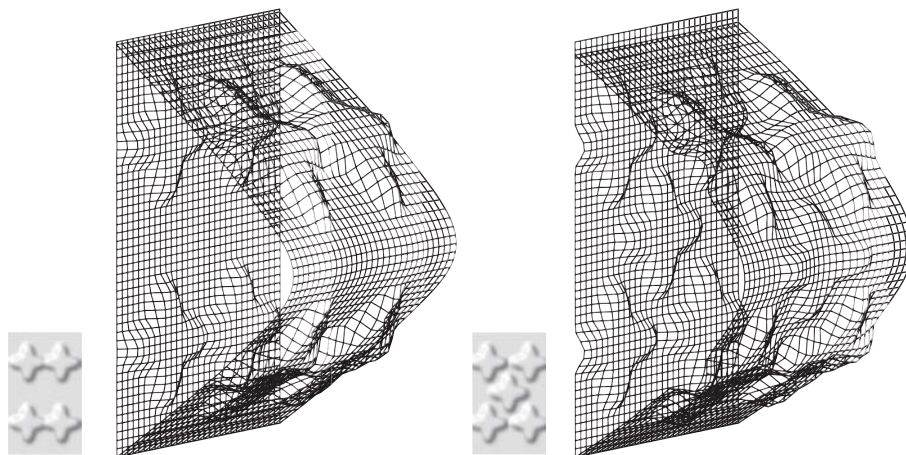


図 3.8 整列配置と千鳥配置の場合の座屈モード

(2) 図形の特徴について、模様が縦長いほど、降伏・座屈耐力とも上がる傾向がある。理由として縦方向に圧縮力を受けるとき、模様が縦長いほど力が伝達しやすいためだと考えられる。

図 3.9 は面積と配置がほぼ同じの円・楕円・直線の模様でエンボスを施したものであり、図 3.11 はほぼ同じ配置の十字型模様であり、いずれの場合も同じ傾向が見られる。特に模様が縦の線分のときに、著しく降伏に強くなり、だんだんカテゴリー I からカテゴリー III に近づく。

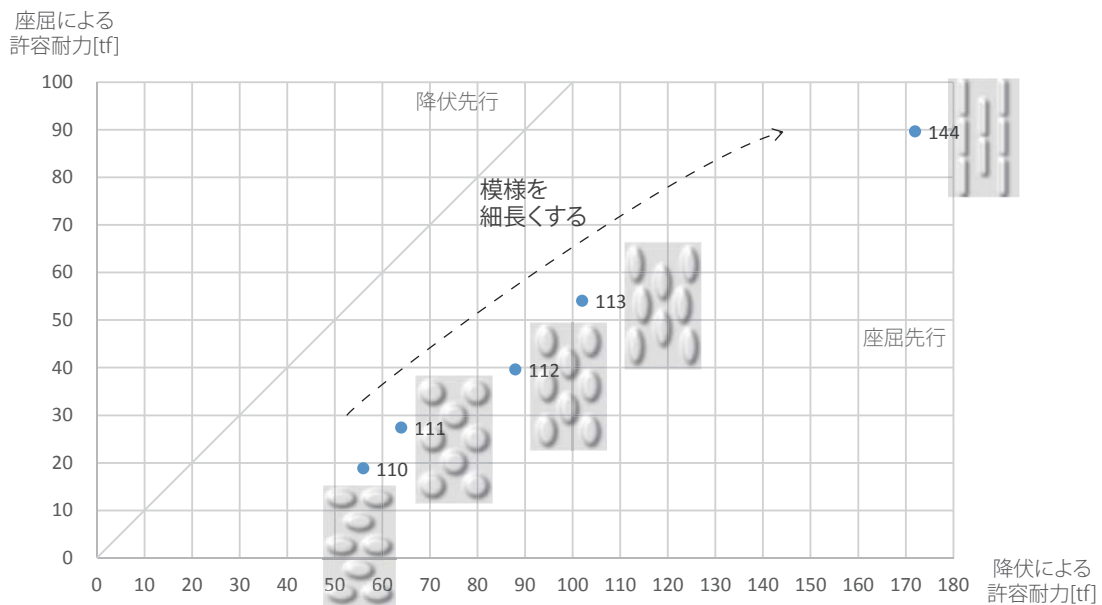


図 3.9 円と楕円と線の模様の耐力分布

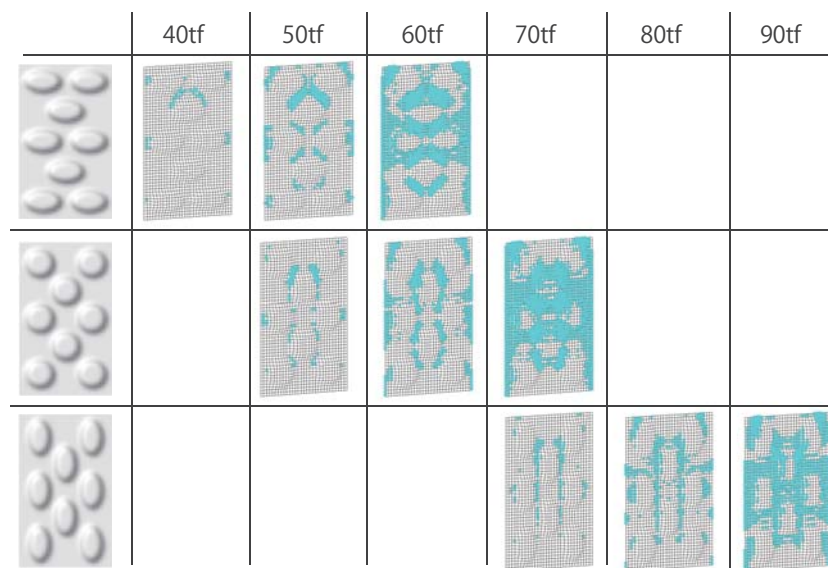


図 3.10 円と楕円の増分解析における塑性ヒンジ図

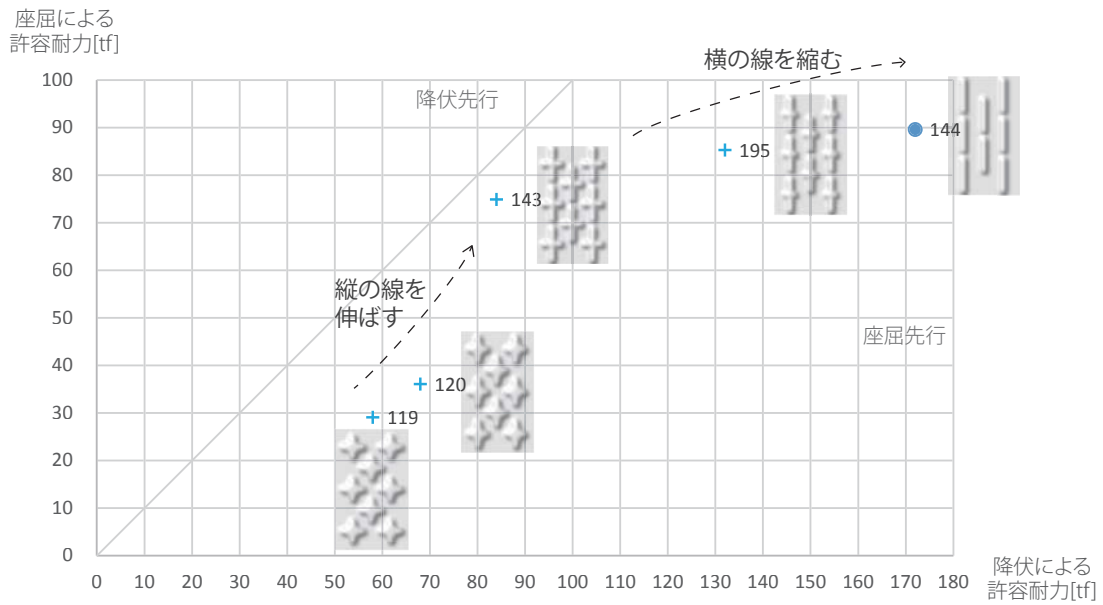


図 3.11 十字型の模様の耐力分布

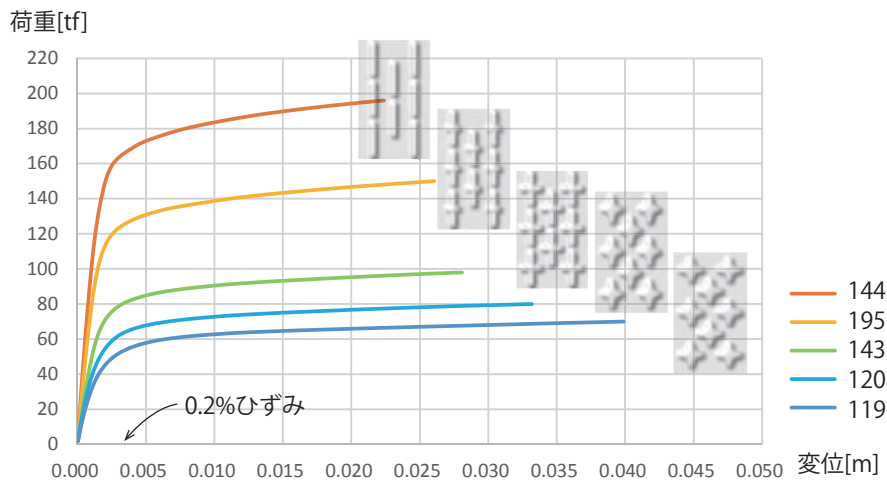


図 3.12 十字型の模様の荷重変形曲線

(3) ある程度の密度で模様をかけるとき、配置と模様の形を変えず、エンボスの面積だけを大きくすれば、座屈が強く・降伏が弱くなる傾向が見られる。これも(1)と同じ理由だと考えられる。

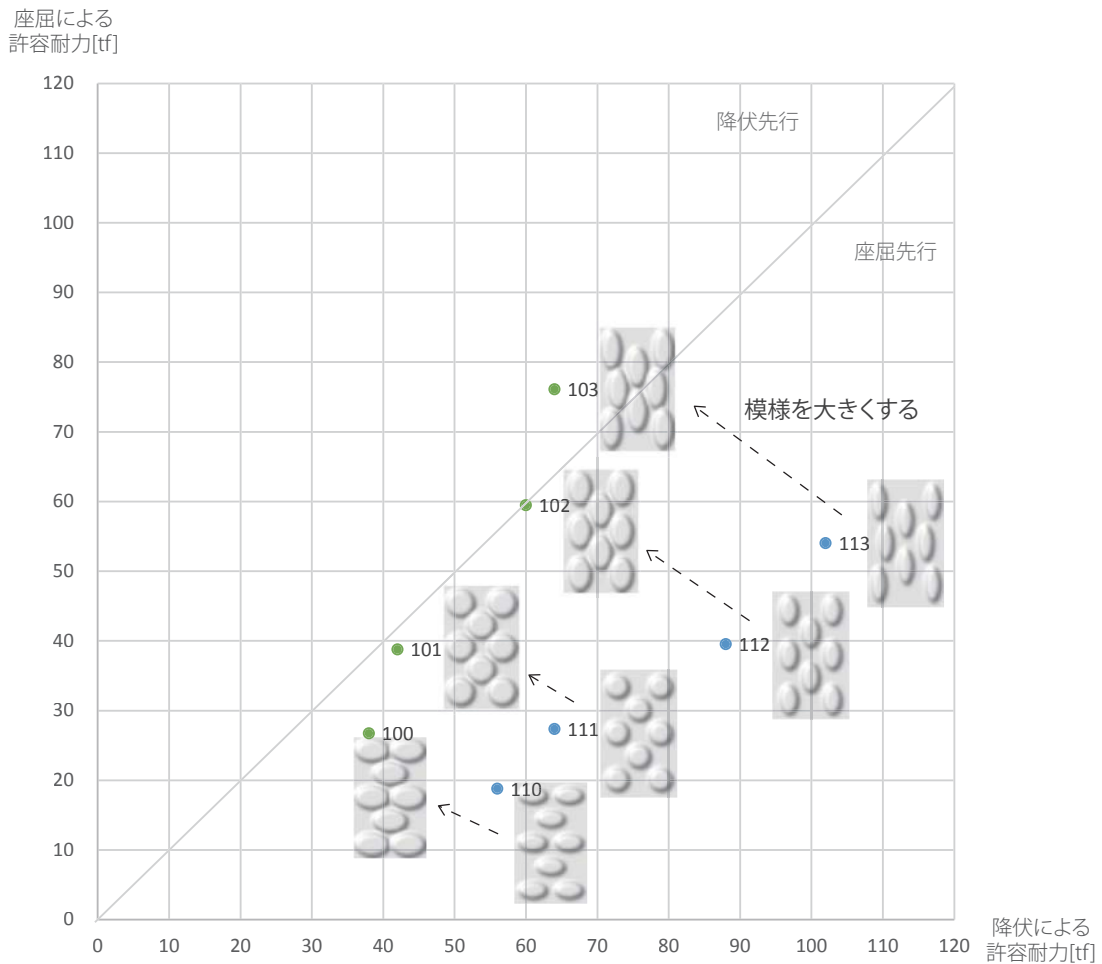


図 3.13 模様を大きくする場合の耐力分布



図 3.14 模様を大きくする場合の塑性ヒンジ図

3.3.2 カテゴリー II

模様の密度および面積を上げるにつれて、模様が複雑になり、「面の模様」と「線の模様」の境目になるのはカテゴリー II の模様である。このカテゴリーの模様はカテゴリー I より全体的に座屈耐力が上がった傾向が見られる。

(1) 面積が小さい面の模様でエンボスを作る場合と、その輪郭線を線の模様としてエンボスを作る場合を比べると、両者が比較的に近い強度が得られた。線の模様のほうがわずかながら降伏耐力が大きく座屈耐力が小さいことが見られる。図形の面積が大きくなればなるほど面と線の模様の違いが大きくなり、図形の特徴によってその強度が一概に論じられない。

座屈による
許容耐力[tf]

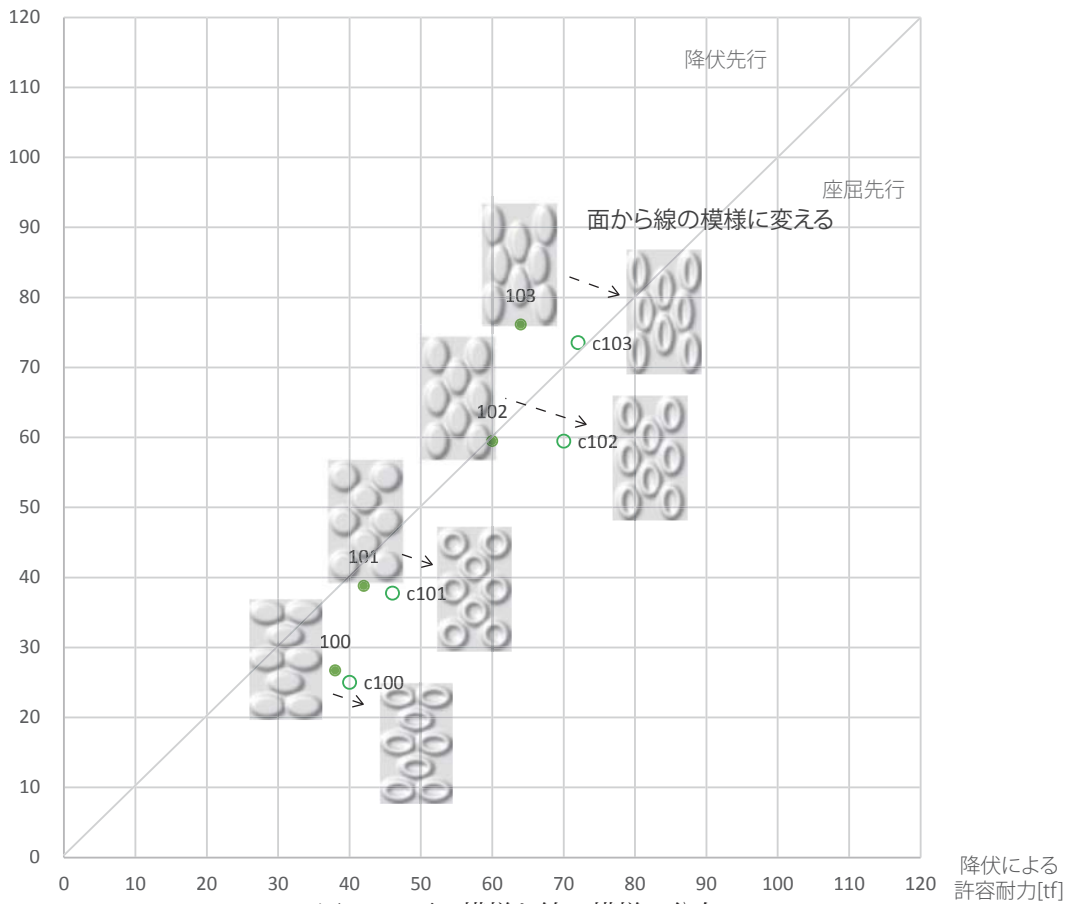


図 3.15 面の模様と線の模様の分布

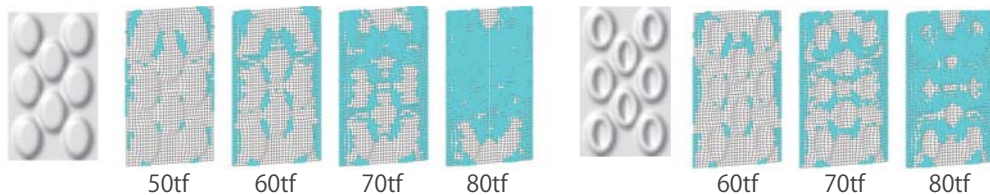


図 3.16 面の模様と線の模様の増分解析における塑性ヒンジ図

(2) 配置が同じで、図形のくい込みがあるほうが座屈に強くなることが分かった。理由として、図形がお互いにくい込むことにより、水平に断面を切るときにまっすぐな面が存在しなく、すなわち横の線の模様がないためだと考えられる。またくい込みが多くなると、エンボス模様を裏返すと面の模様が線の模様としても解釈でき、カテゴリ II からカテゴリ III に近づく。

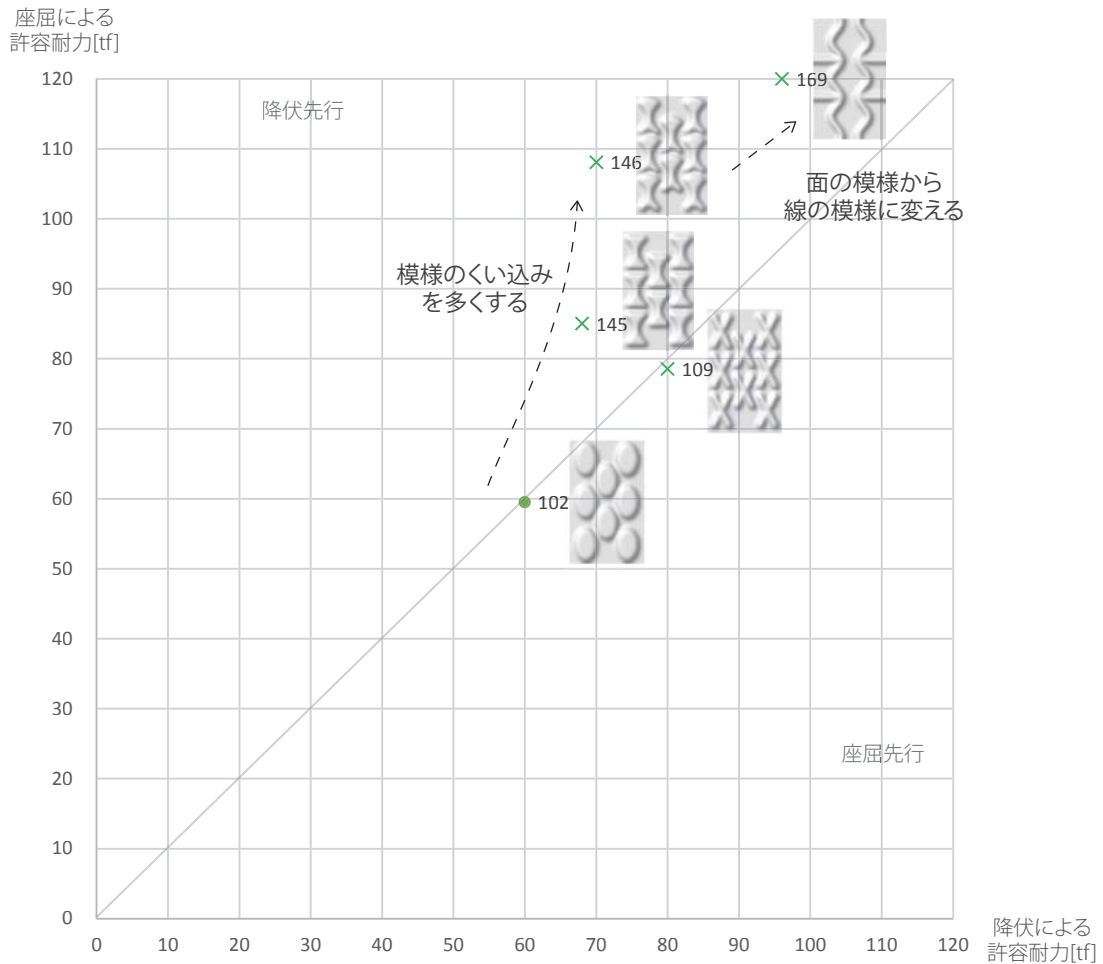


図 3.17 模様が互いにくい込むときの挙動

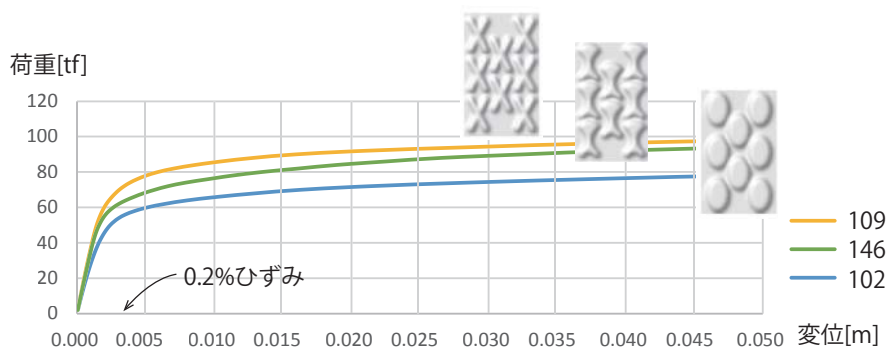


図 3.18 模様が互いにくい込むときの荷重変形曲線

(3) 大きい範囲で線の模様でエンボスを施す場合も、横の線分があるほど強度が下がり、特に降伏に弱くなる傾向がある。縦の線分があるほど座屈強度が上がるが、模様が複雑になると逆に降伏強度が下がる。

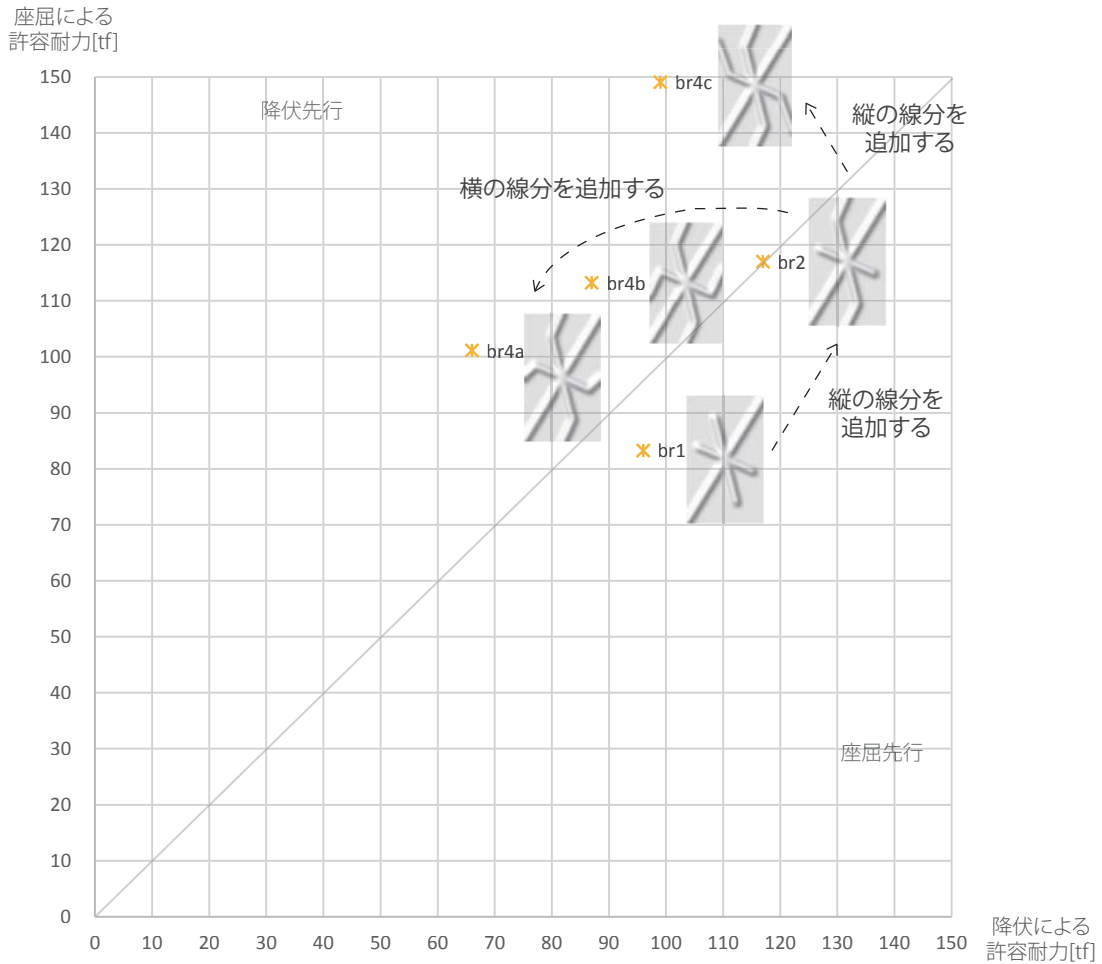


図 3.19 線の模様からエンボスを施すときの分布

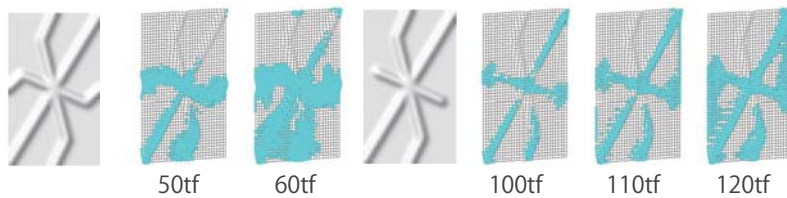


図 3.20 線の模様の増分解析における塑性ヒンジ図

3.3.3 カテゴリー III

カテゴリー III は、カテゴリー II から冗長な横の線分を除き、多くが縦の線の模様からエンボスを施したものである。全体的にカテゴリー III の模様は降伏または座屈または両方が強い特徴がある。

(1) 上から下まで縦の直線が引かれたときの模様が今回の解析の中では一番強かった。これがよく知られていた「波板」ともいえる。また、線の傾きが縦に近いほど模様が強く、横に近いほど弱い傾向がある。

また、図 3.21 のように、直線の模様とそれに似たような曲線の模様で解析したが、どれのほうが強いかについて強い傾向が見られず、むしろ曲線を直線に変えたアルゴリズムで線の傾きがより縦になったかどうか次第である。

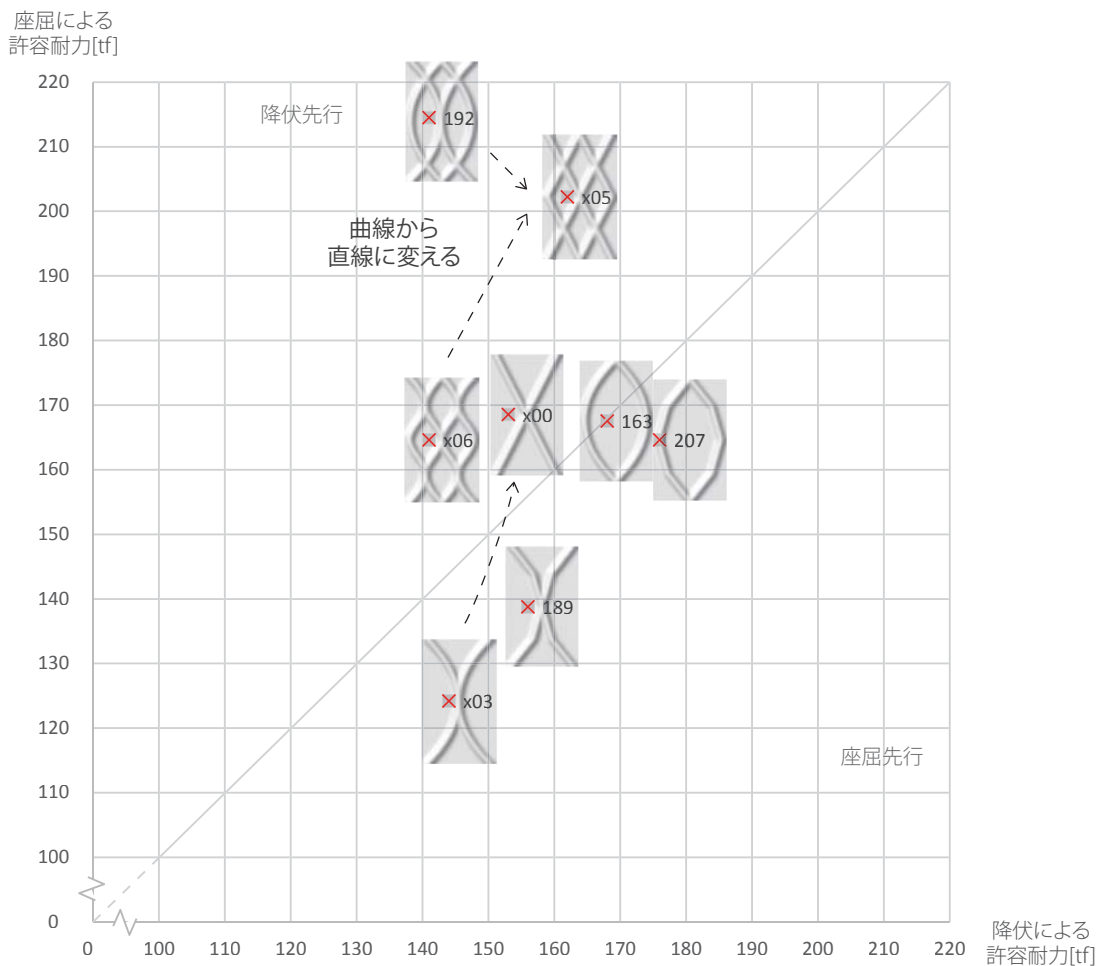


図 3.21 直線の模様と曲線の模様の分布

(2) 縦の線と横の線を組み合わせた十字の模様は座屈にある程度耐えられるが、降伏に弱い傾向がある。これに対し、点線のように、短くて不連続の縦線の模様のほうが降伏に耐えられる一方、座屈に弱い傾向が見られる。したがって、横の線が模様に入っているかが降伏に大きく影響し、模様で縦の線が上下連続につながっているかが座屈に大きく影響すると推測される。

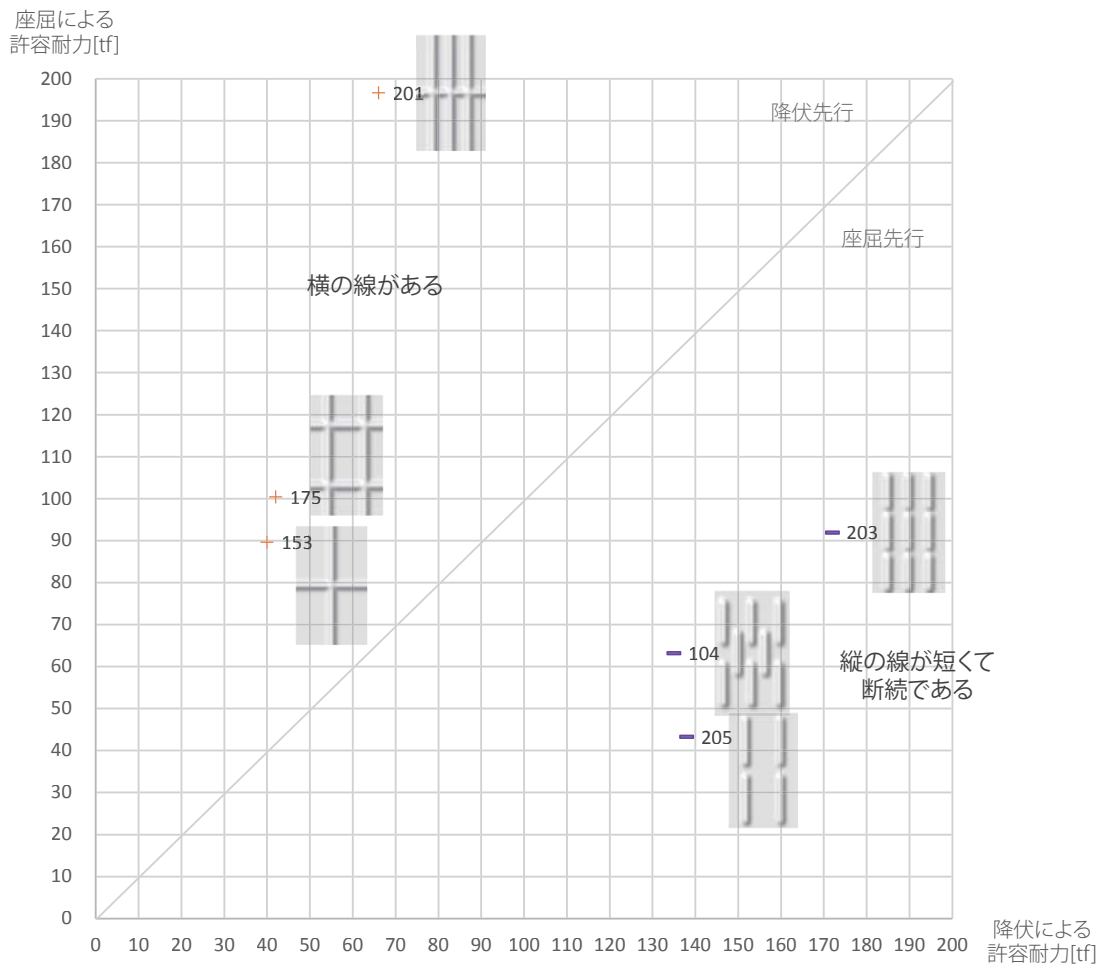


図 3.22 連続の線の模様と断続の線の模様

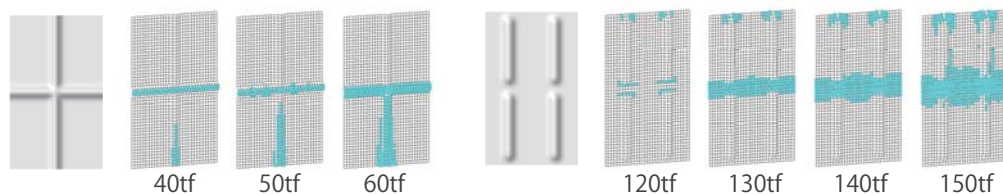


図 3.23 連続の十字の線の模様と断続の線の模様のヒンジ図

3.4 エンボス模様と力学の関係

各カテゴリで得られた結果を統合し、エンボス模様を変えればその耐力がどう変わるかについて以下のようにまとめられる。

降伏・座屈と強くなる：

模様を細長くする

傾きを縦にする

座屈のみが強くなる：

分散的に模様を配置する（降伏が弱くなる）

模様のボリュームを増やす（降伏が弱くなる）

くい込みを増やす（降伏に影響が小さい）

上下連続な直線を描く（降伏も少し強くなる）

降伏のみが強くなる：

横の線を減らす（座屈も少し強くなる）

小範囲で面の模様をその輪郭線による線の模様に変える（座屈に影響が小さい）

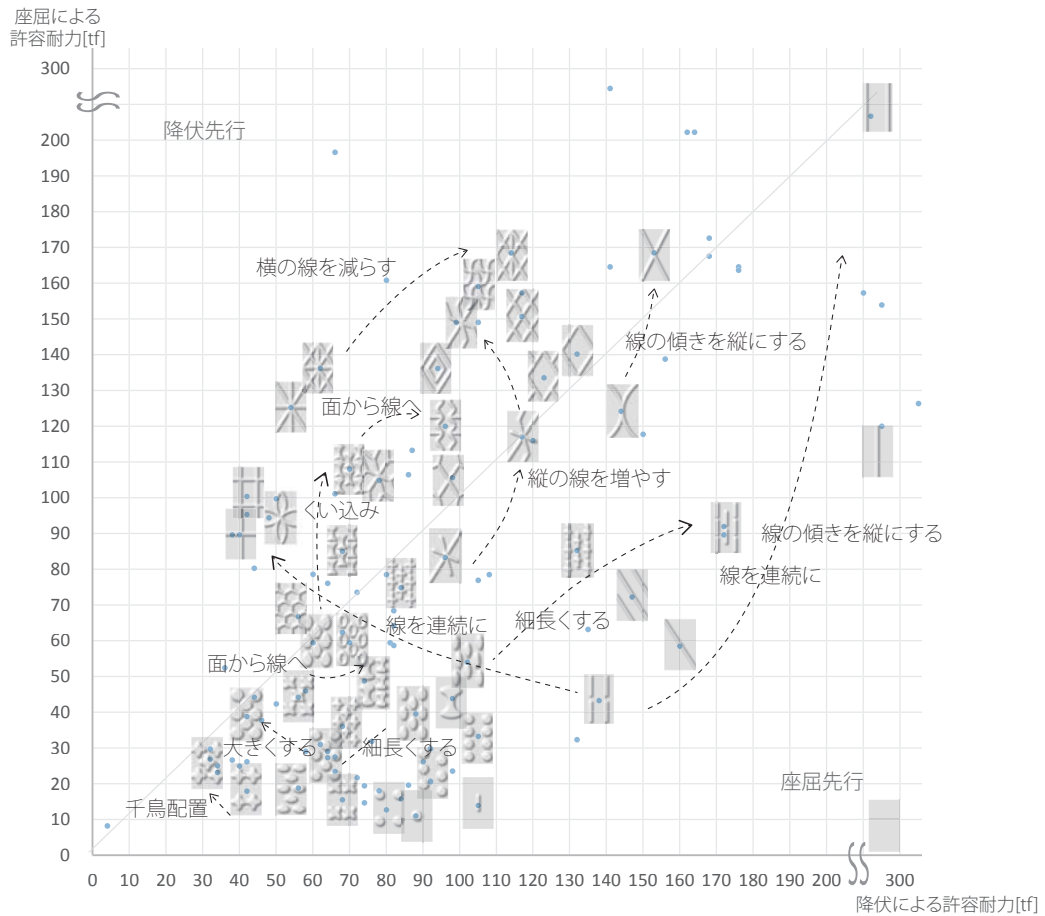


図 3.24 模様の変更と耐力の変化関係

3.5 考察

本章には平板およびエンボスを施した薄板に、長手方向に圧縮力をかけるときの解析を行い、降伏と座屈のグラフにプロットした。また、エンボス模様をカテゴリ化し、それぞれのカテゴリの模様の特徴と降伏・座屈耐力の関係を調べた。

解析結果より、エンボス化した薄板は平板より座屈耐力が上がる事が明らかになり、エンボスを施すことで薄板が強度向上できることが検証された。

エンボスの模様について、全体的に単純な面の模様が全体的に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、だんだん降伏先行の領域に入る。単純な縦線の模様は全体的に座屈・降伏または両方に強い傾向が見られた。また、エンボスの形を調整することで耐力を増やす方法について考察した。

以上のことで、一方向圧縮を受けるエンボス模様の耐力分布に関するデータベースを構築し、またエンボスの模様と力学の挙動との関係を示した。

第4章 二方向圧縮

本章では平板およびエンボス板に対して、二方向に圧縮を掛けるときの降伏・座屈耐力を調べる。また模様の特徴と耐力との関係を分析し、さらに一方向圧縮時の挙動との違いについて考察する。

4.1 パラメータの設定

二方向圧縮の解析を行うにあたって、2章で説明した手法と異なったパラメータの設定について説明する。

4.1.1 板の情報

二方向圧縮の解析において、高さ 1200mm、幅 1200mm、厚み 12mm の正方形鋼板にそれぞれの模様でエンボスを施すこととする。鋼板の材料情報・エンボスのアルゴリズムとパラメータは一方方向圧縮の場合と同じである。

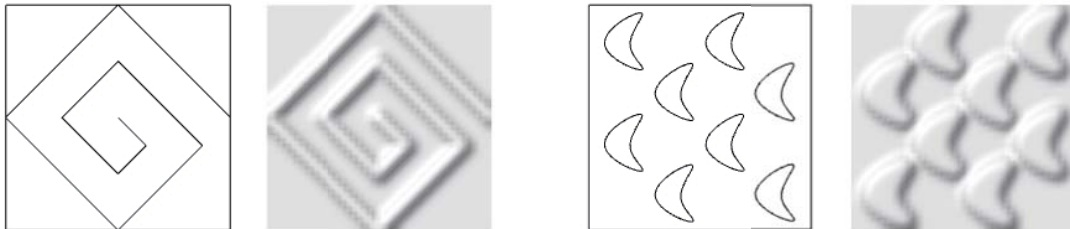


図 4.1 正方形板に線の模様と面の模様でエンボスを施した例

支持条件について、正方形板が図 4.2 のように XZ 平面に置かれたときに、モデルの左下にピン、右下に X ローラー、左上に Z ローラーで支持し、外周のほかの節点には XY ローラーがあるものとする。

荷重条件について、自重を無視し、上下左右に等分布荷重 P ずつ掛けるものと想定する。

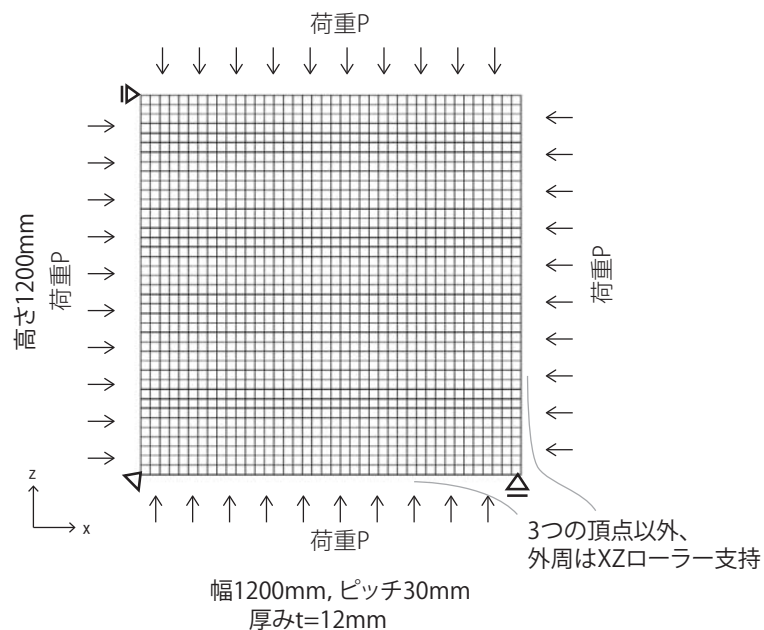


図 4.2 支持条件と荷重条件

4.1.2 モデル化

モデル化の仕方について、一方向圧縮と同じように 30mm ピッチの正方形メッシュで分割し、40*40 マスのメッシュを作る線材としてモデル化する。

線材の有効幅について、板の面外剛性を調べたいため、図 4.3 のように 4 辺単純支持の平板の中心に集中荷重が作用するときたわみを基準として、理論値と解析が合うように有効幅を設定した。計算方法は次に示す。

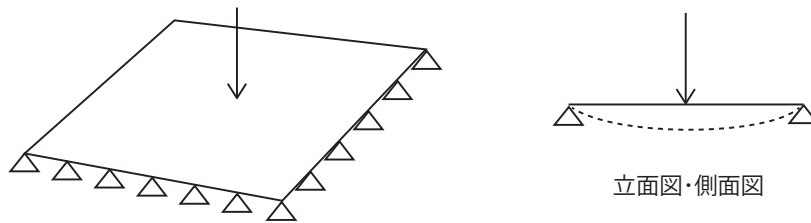


図 4.3 面外剛性による有効幅の求め方

文献^[17]より、中心に集中荷重が作用する 4 辺単純支持平板のたわみの理論値は

$$w_{max} = 0.01160 * \frac{Pa^2}{D} \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (\text{式 4.1})$$

と計算され、なお P, a, E, h, ν はそれぞれ荷重、辺の長さ、ヤング係数、厚み、ポワソン比を表す。平板モデルのパラメータを代入すれば、たわみの理論値は

$$w_{max} = 0.008249m \quad (\text{式 4.2})$$

である。

一方、有効幅を変えて解析をした結果が表 4.4 になる。

表 4.4 たわみの解析値

有効幅	たわみ [m]
60% pitch	0.007374
50% pitch	0.008849
55% pitch	0.008045
54% pitch	0.008194
53.5% pitch	0.008270

よって、線材の有効幅がピッチの 0.535 倍の 16.05mm とする。

4.1.3 解析と耐力評価の仕方

解析の手法について同様に荷重増分解析と座屈固有値解析を行う。

荷重増分解析について、降伏曲面・加力の設定については一方向の場合と同様にする。荷重変形曲線について、モデルの上端の平均変位と右端の平均変位をそれぞれ取り、それぞれ荷重変形曲線を描き、0.2%耐力を取る(図4.6)。2つの方向の耐力のうち、小さいほうをモデルの降伏による許容耐力とする。なお、耐力の小さいほうがX軸方向の耐力にあるように、一部の模様を90度回転する操作を施す。

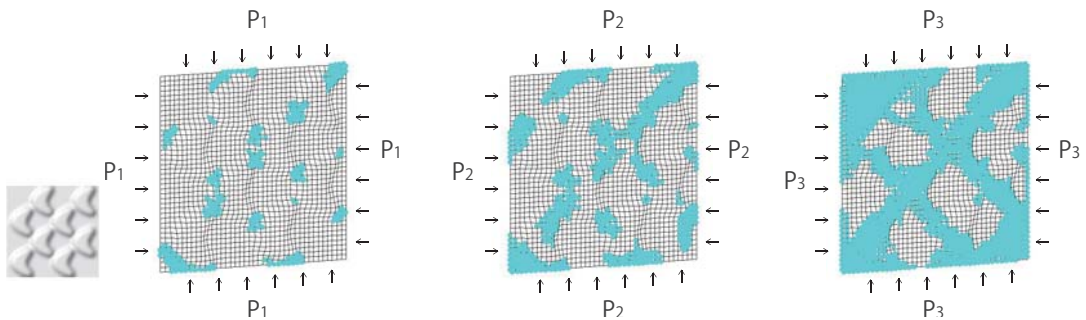


図 4.5 荷重増分解析の例

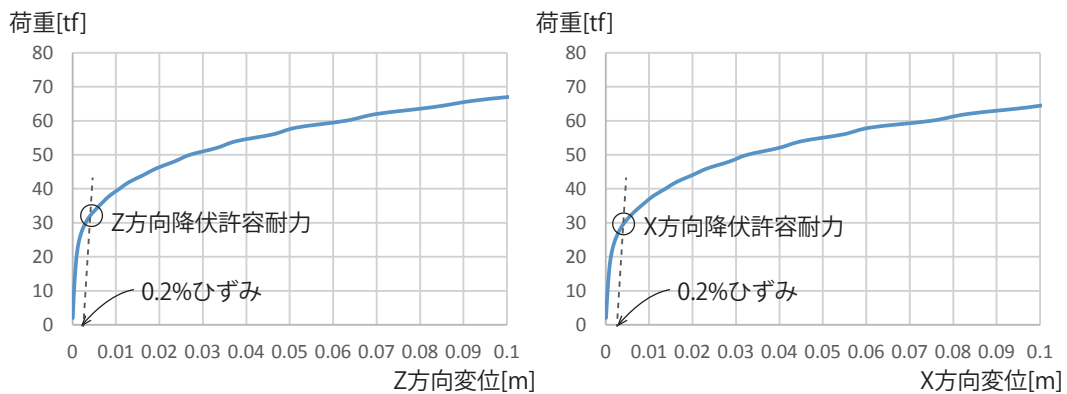


図 4.6 Z方向とX方向の降伏による許容耐力の例

座屈固有値解析は2章と同じ手法で行う。また同様に横軸を降伏、縦軸を座屈による許容耐力とするグラフにそれぞれの模様をプロットする。

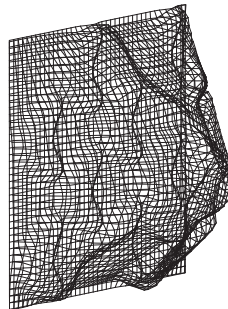


図 4.7 座屈解析の例

4.2 平板の解析

模様をかけない平らな板について、降伏による短期許容耐力が理論値が 380.2tf であると算出した。また解析により座屈の許容耐力が 22.63tf である。これは、平板に対して座屈が先行で、22.63tf まで耐えられると意味する。

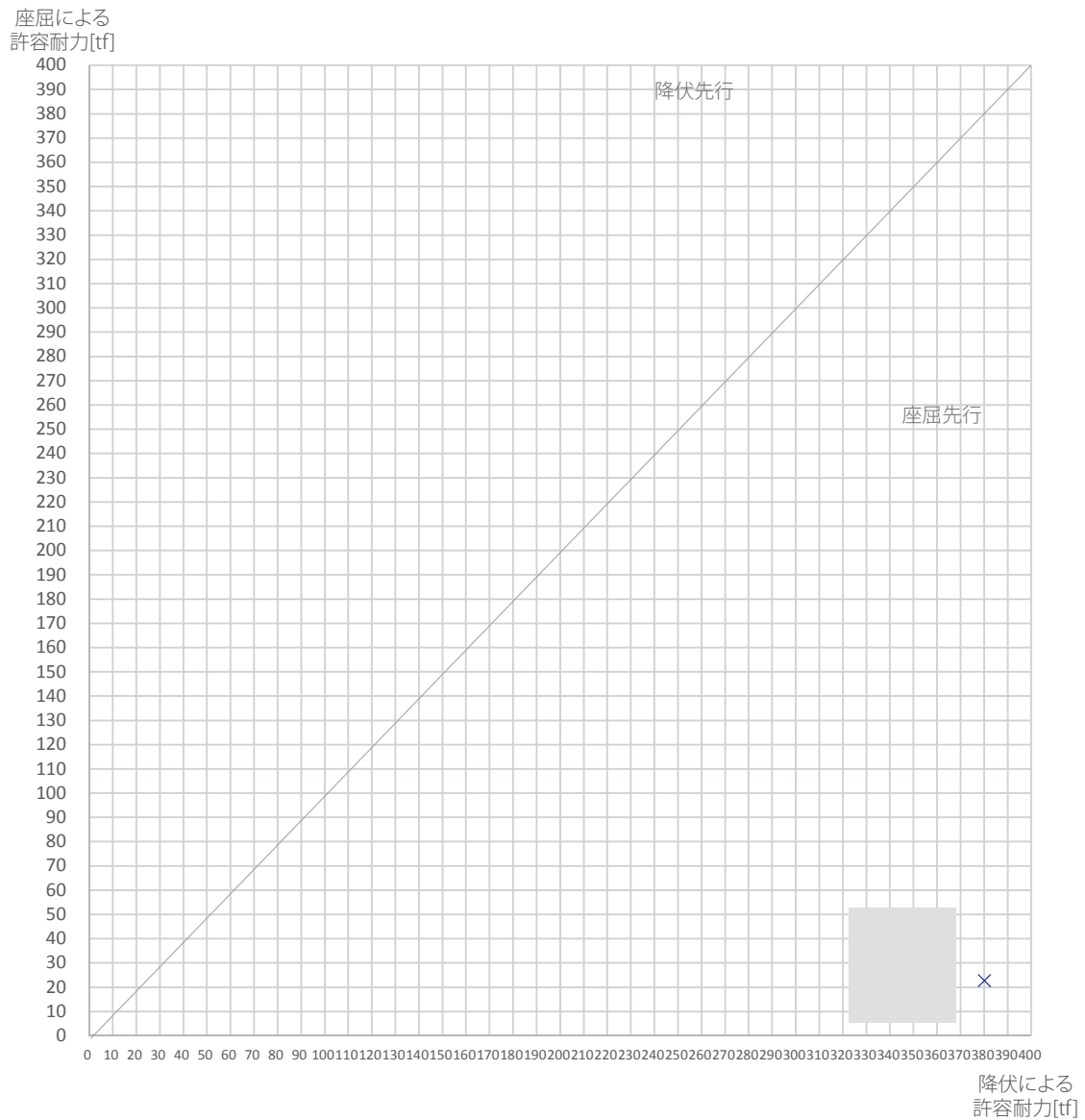


図 4.8 平板の解析

4.3 エンボス模様の解析

様々な模様について解析し、それぞれの降伏・座屈による耐力を図 4.9 にプロットした。また、付録に解析したすべての模様と耐力について載せてある。

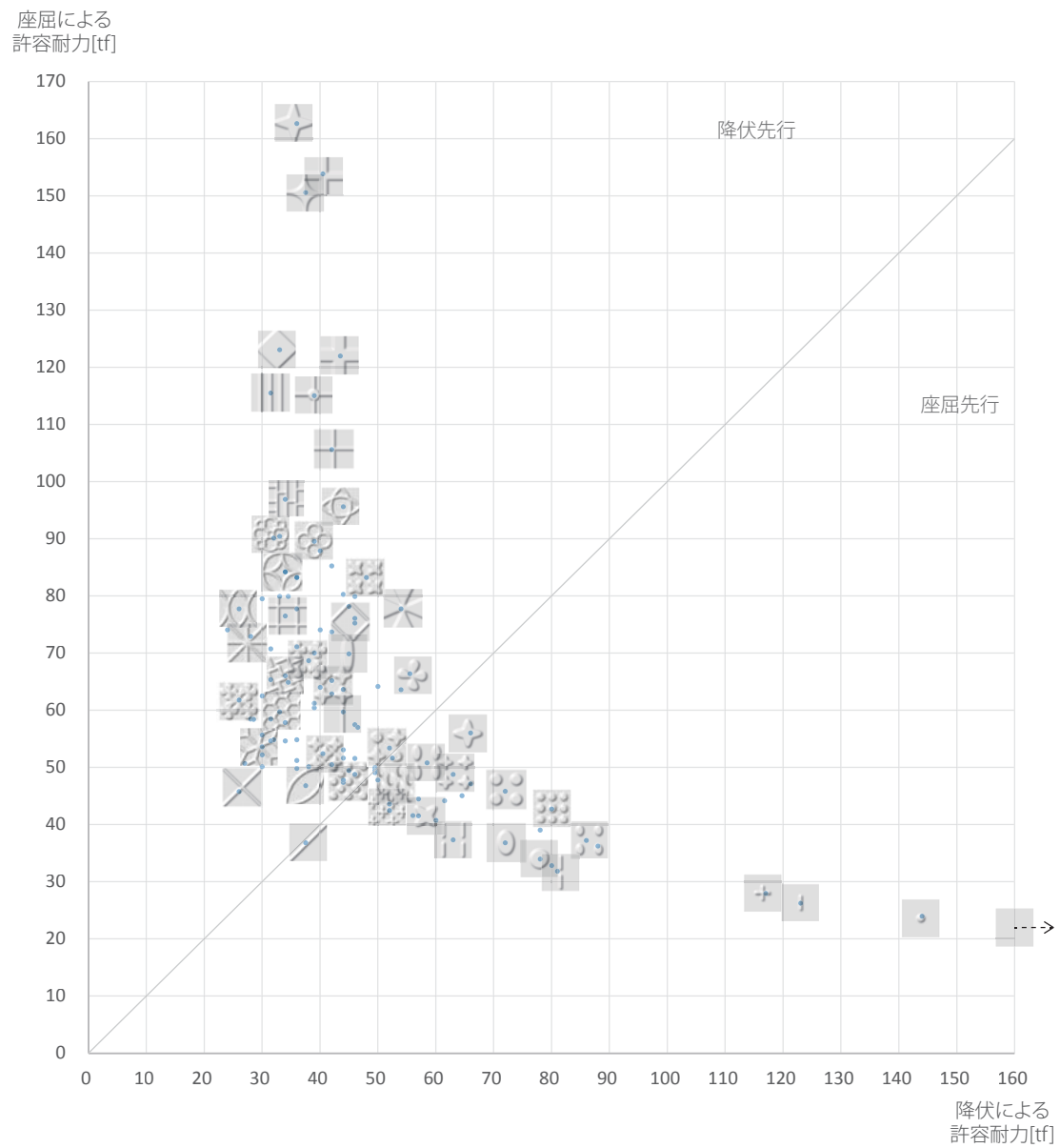


図 4.9 エンボス模様の解析

プロットした模様分布が3章に比べてより複雑であるが、ここでは3章と似たように模様を3つのカテゴリーに分けてその分布を論じたい。

カテゴリーIは、比較的単純な面および短い線の模様でエンボスを施したものである。このカテゴリーの模様はグラフの右下にある座屈先行のパターンに属するものが多く、比較的強い降伏耐力があるものの、座屈に弱い特徴がある。

カテゴリーIIは、比較的複雑な面または線の模様から構成される。このカテゴリーの模様はグラフの左下から中央の部分にあり、降伏より座屈が少し強くて降伏先行の傾向が多く見られる。

カテゴリーIIIは、長くて比較的シンプルで線の模様からエンボスを施したものである。このカテゴリーの模様の分布は3章より複雑であり、全体的にグラフの左の降伏に弱いところであり、また模様によってグラフの左上の座屈耐力がきわめて大きいところにある。

以下、それぞれのカテゴリーの模様の分布について分析をしたい。

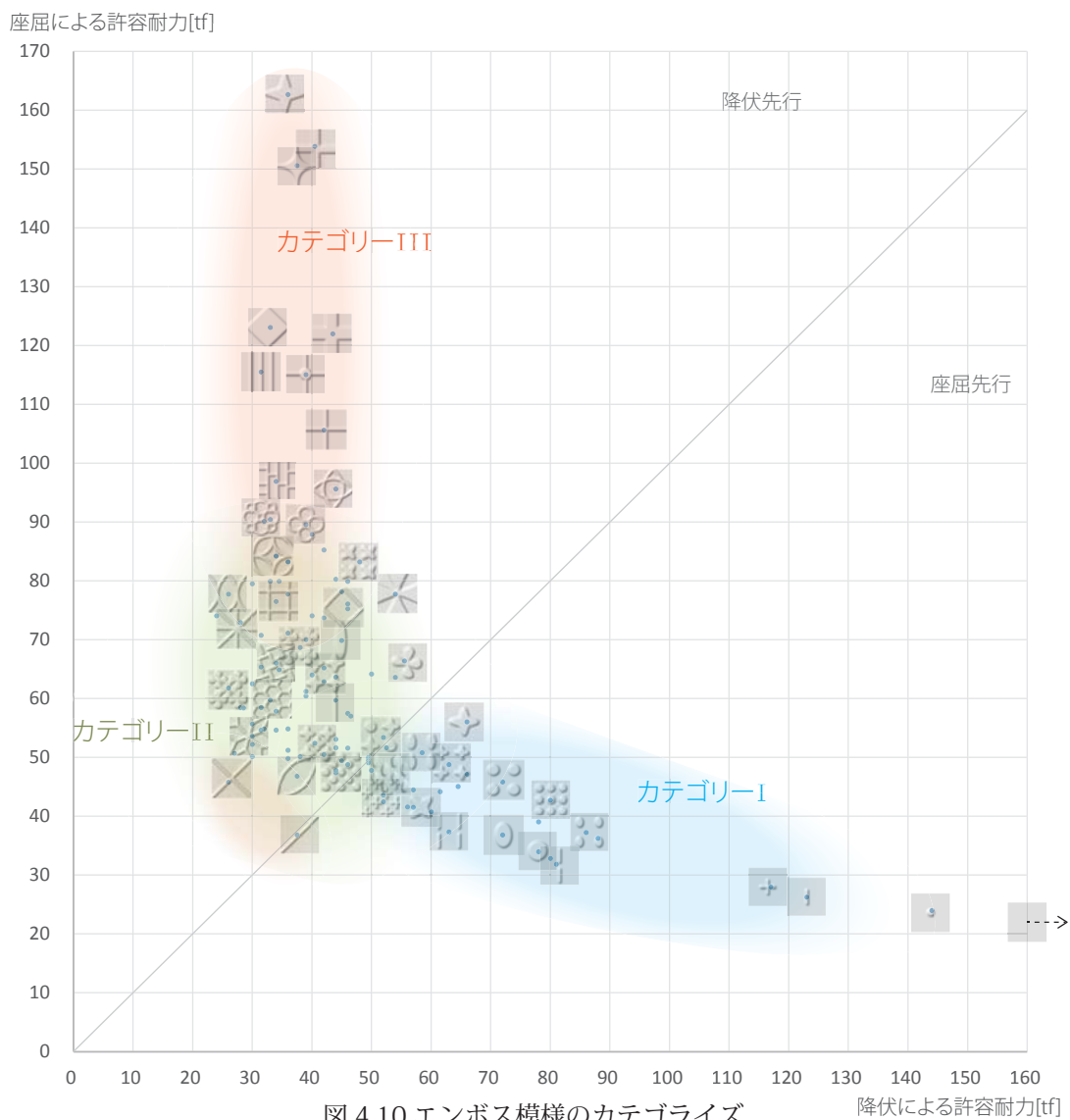


図 4.10 エンボス模様のカテゴリライズ

4.3.1 カテゴリー I

カテゴリー I は比較的に単純的な図形でエンボスを施したものであり、3章のカテゴリー I と同様に座屈に弱い特徴が見られる。

(1) 図形の配列について、ある程度密に模様をつけないと座屈耐力が低くて、逆に模様が多くなると降伏耐力が落ちる傾向がある。これは 3.3.1 節に挙げた理由と同じで、挙動も同じである。

(2) 図形の特徴について、模様が縦長いほど座屈耐力が上がるが、3章と違って降伏耐力が下がる傾向が見られる。降伏耐力について、二方向から圧縮を受けたため、模様が縦長いほど、横方向に耐えられる力が小さくなり、より塑性化しやすくなり、降伏耐力が落ちると考えられる。

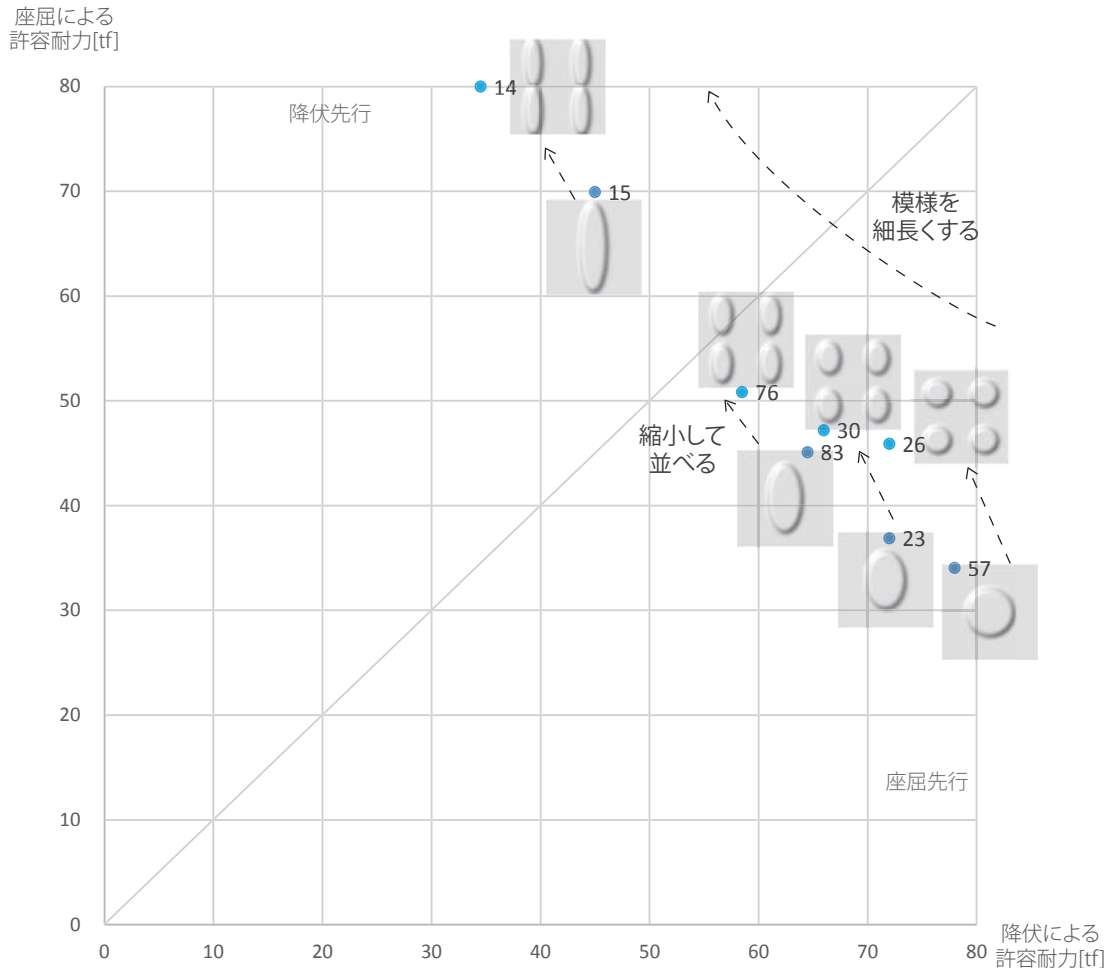


図 4.11 円形と楕円形模様の耐力分布

図 4.11 は 1 つの大きな円または楕円の模様と、同じ図形を縮小して何個か並べる模様を比べたものである。図 4.12、図 4.14 は模様の塑性ヒンジ図、図 4.13 は模様の座屈モードを示す。ある程度分散したほうが座屈によいが、起伏が細くなるにつれて降伏強度が下がることを示す。また円より楕円の模様のほうが座屈に強く、降伏に弱い傾向を示す。

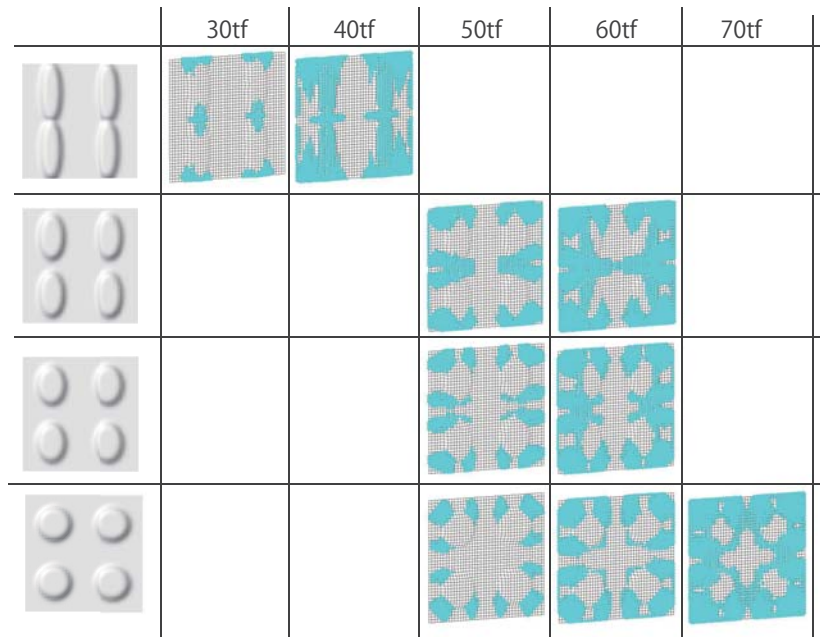


図 4.12 模様を細長くする場合の塑性ヒンジ図

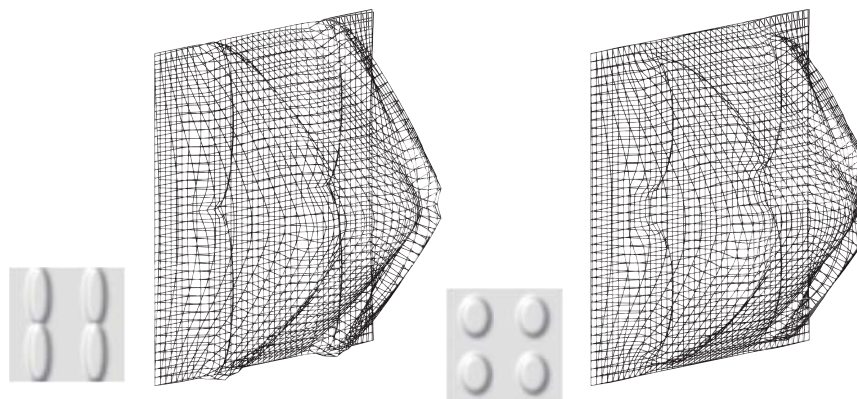


図 4.13 模様を細長くする場合の座屈モード



図 4.14 模様を縮小して並べる場合の塑性ヒンジ図

図 4.15、図 4.16 がクロス形のエンボスを施したものであり、同様に模様が細長いほど降伏耐力が落ち、座屈耐力が上がる結果が得られた。

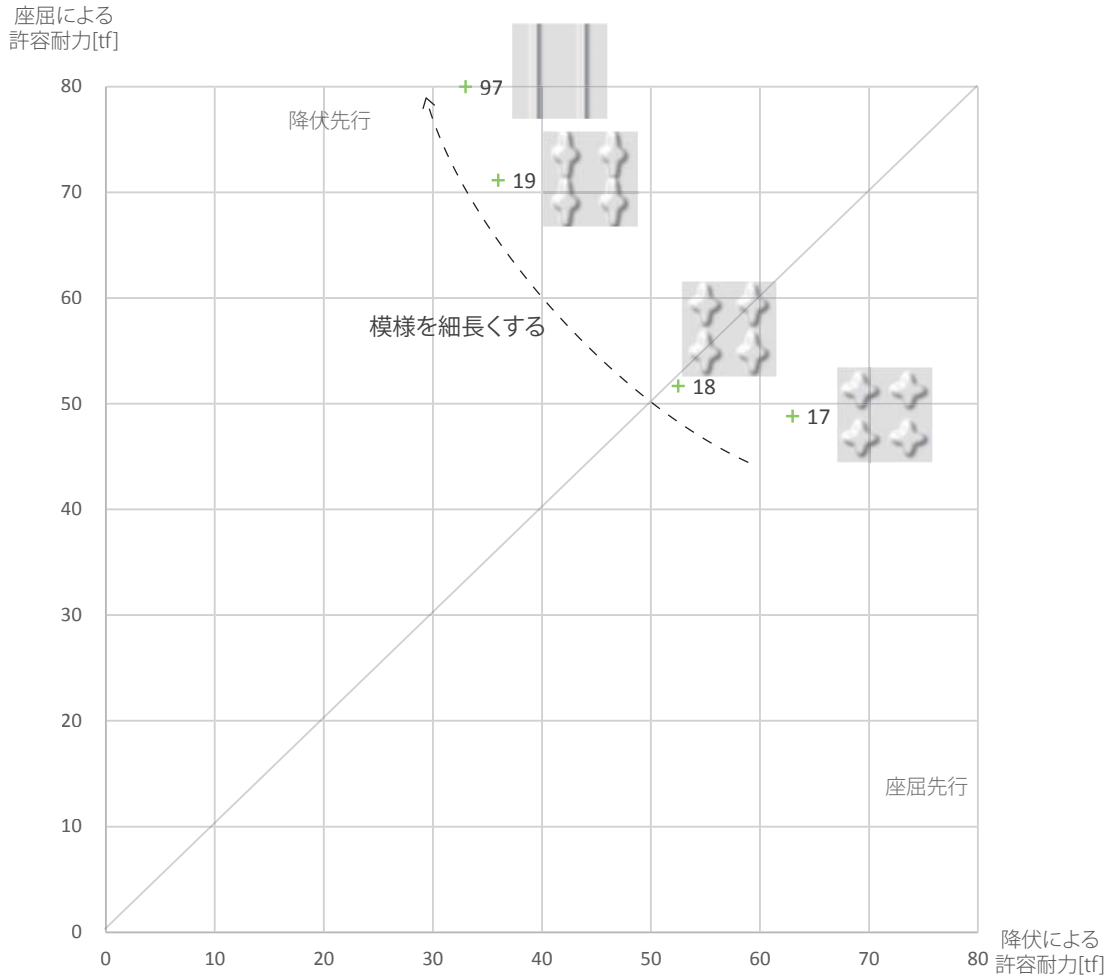


図 4.15 クロスの形のエンボス模様の耐力分布

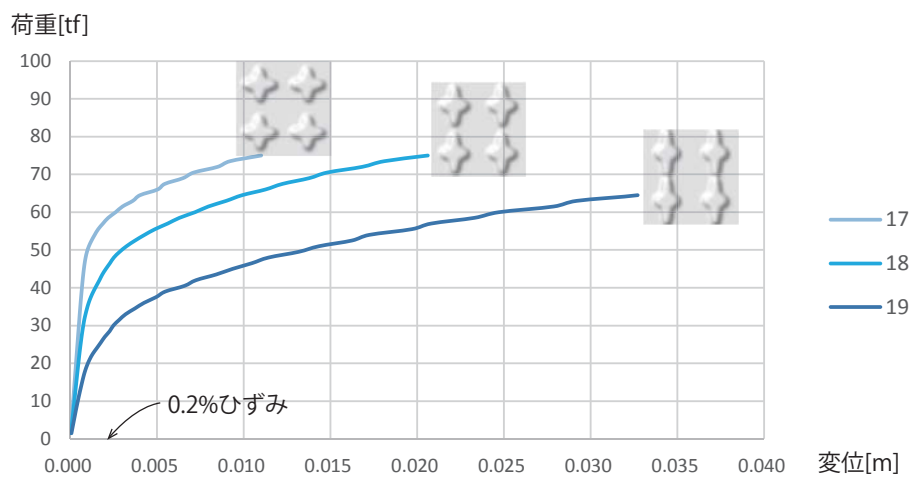


図 4.16 クロスの形の模様の荷重変形曲線

(3) 配置と模様の形を変えず、エンボスの面積だけを大きくすれば、座屈がわずかに強く・降伏が弱くなるという 3 章と同じ傾向が見られた。

座屈による
許容耐力[tf]

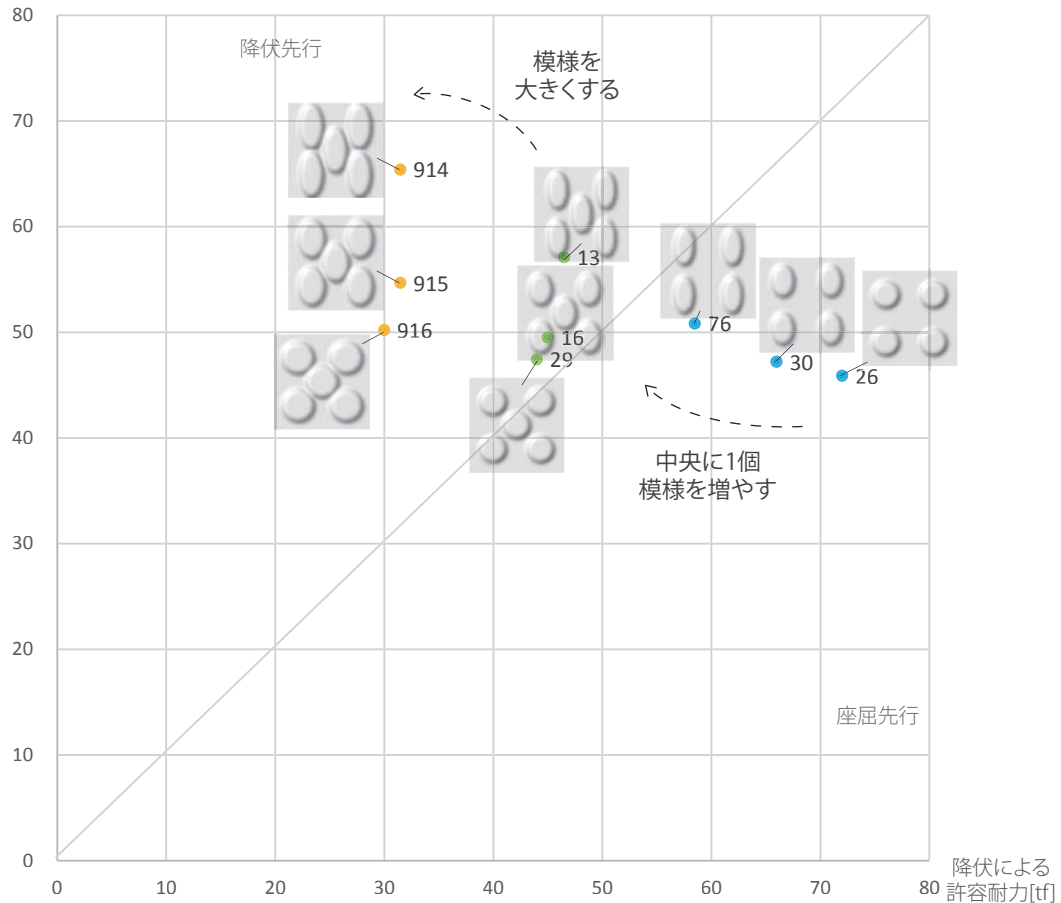


図 4.17 エンボスの面積を増やす場合の耐力

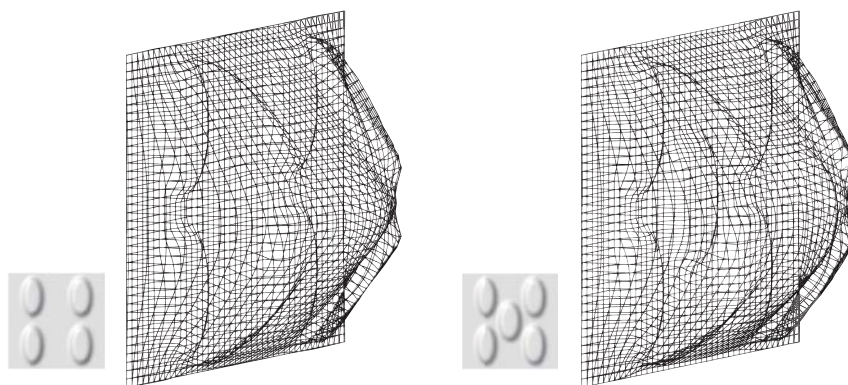


図 4.18 整列配置と千鳥配置のときの座屈モード

4.3.2 カテゴリー II

より複雑な模様で構成されるカテゴリー II は、全体的にカテゴリー I に比べて座屈耐力が上がる一方、降伏耐力が下がり、降伏より座屈がわずかに強い傾向が見られる。

(1) 小さい範囲において、面の模様でエンボス化するものと、その輪郭線を線の模様としてエンボス化するものを比べると、3章と同様に、線の模様のほうがわずかに降伏耐力が大きい傾向が見られた。

座屈による
許容耐力[tf]

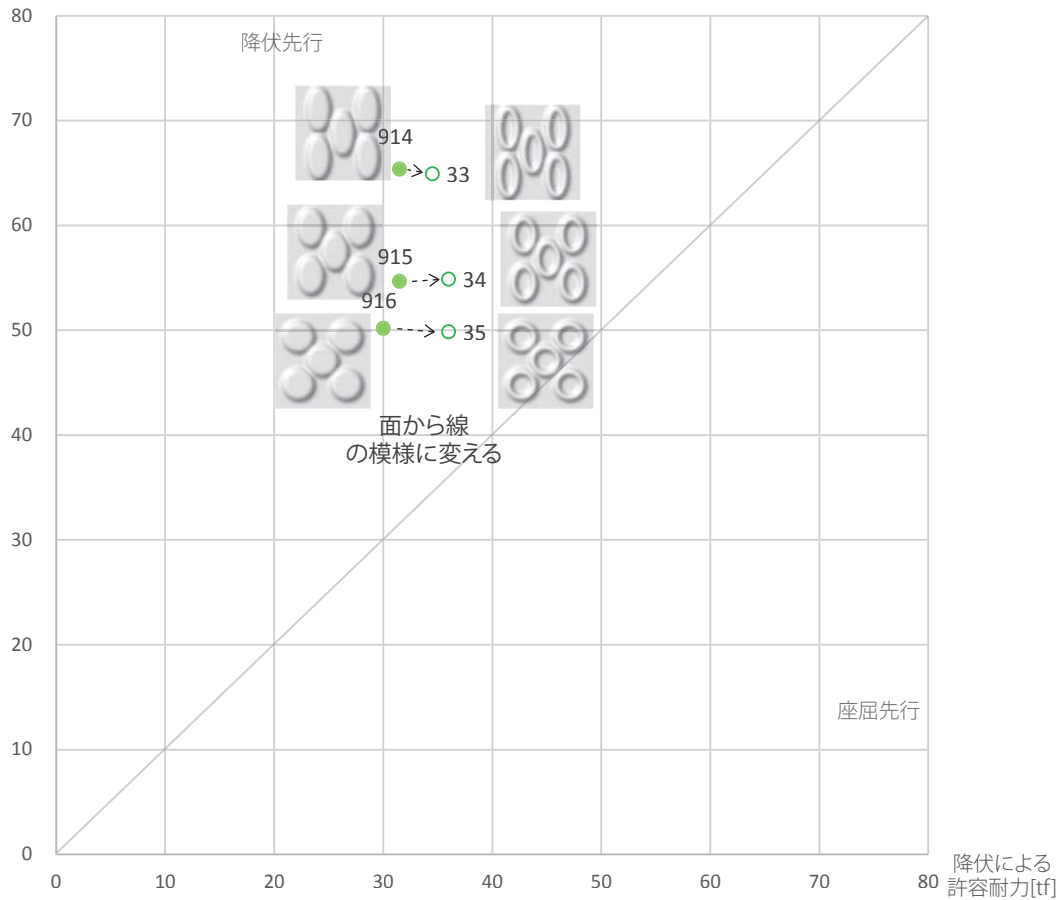


図 4.19 線の模様と面の模様の耐力

(2) 配置が同じで、図形の入り込みがあるほど座屈に強くなることが分かった。またくい込みがあるにつれて降伏耐力が落ちることが見られた。これも3章のときの挙動と同じである。

図 4.20、図 4.21 は配置が同じで面積もほぼ同じの円形模様と十字・X字型の模様である。くい込みが多くなるにつれ降伏が下降し座屈が上昇する。また模様もだんだん面の模様から線の模様に近づく。

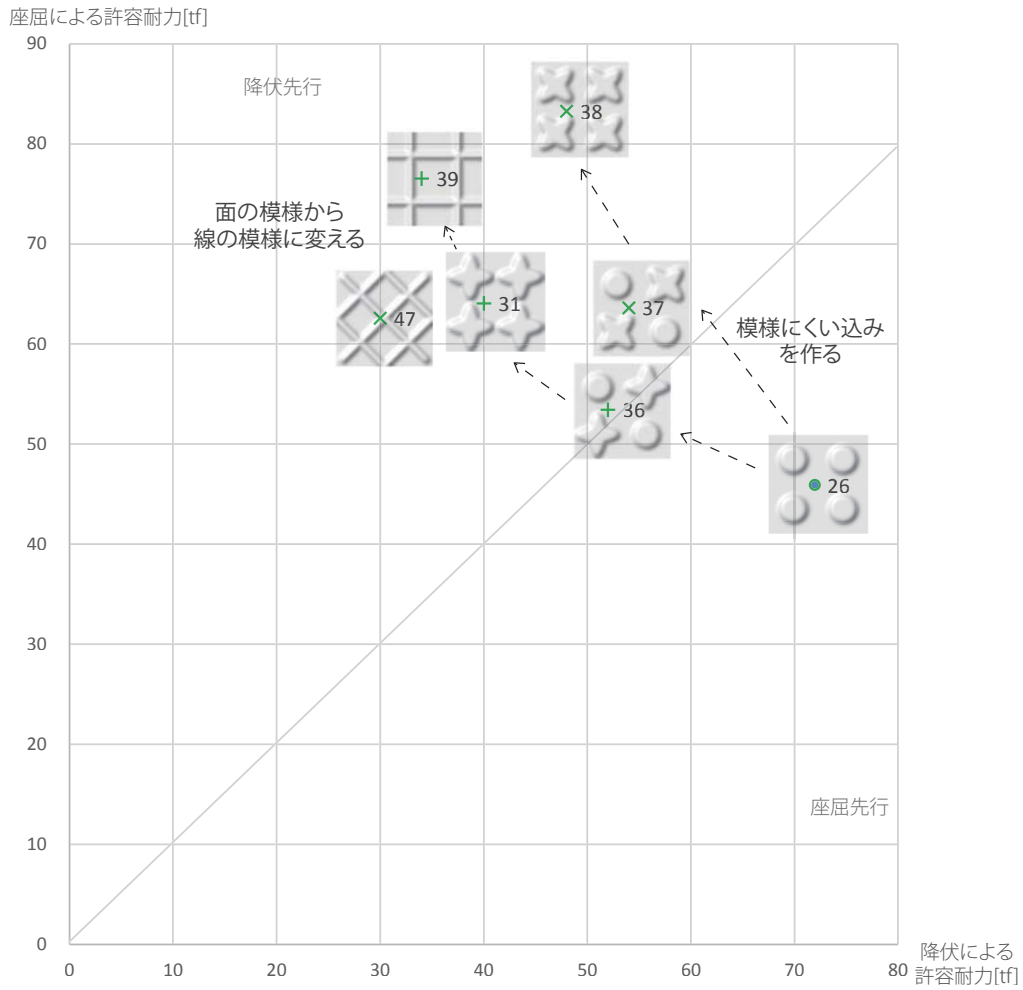


図 4.20 くい込みによる座屈耐力の上昇

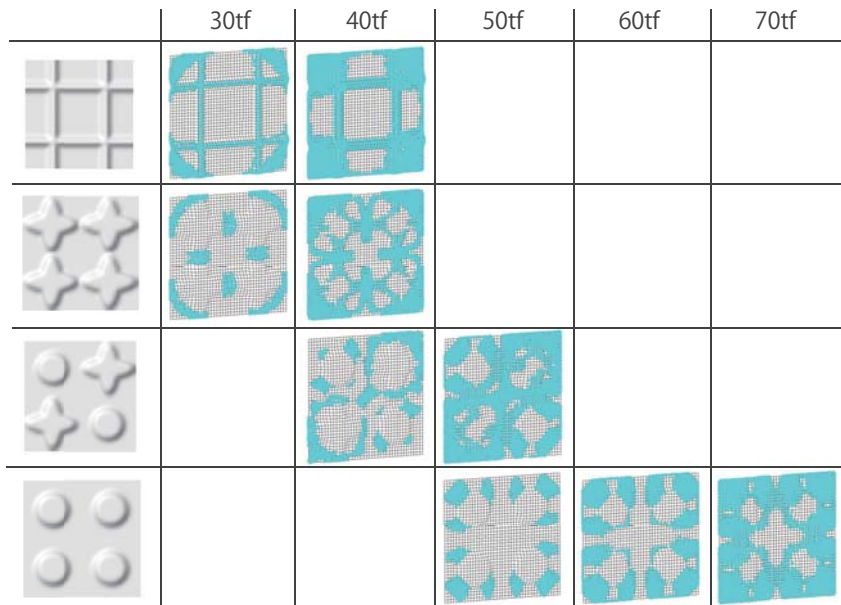


図 4.21 くい込みの場合の塑性ヒンジ図

4.3.2 カテゴリー III

カテゴリー III は、比較的単純な線の模様でエンボスを施したもののから構成される。3章と違って、降伏・座屈とも強いものが本研究で見つけられず、模様が全体的に降伏耐力が弱い傾向が見られる。一方、そのうちに、座屈耐力がきわめて強い模様も見られた。

(1) 線が斜めの場合には線が縦（横）の場合よりも降伏・座屈とも弱い結果が得られた。これは3章と違う挙動をしている。斜めの線分をまっすぐにするによって、降伏・座屈とも上がる傾向が見られた。

座屈による
許容耐力[tf]

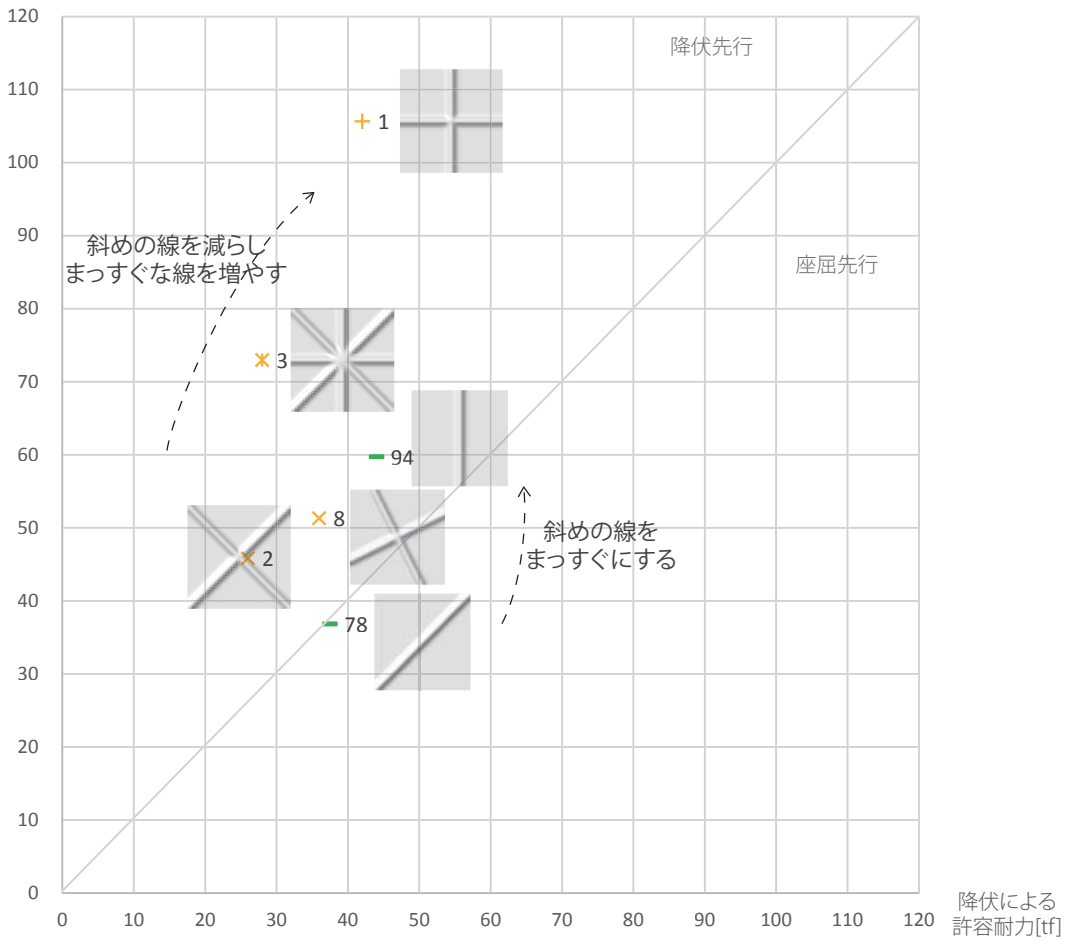


図 4.22 縦横の線と斜めの線の模様の耐力分布

(2) 断続的な線の模様を連続にすることによって座屈強度が上がるが見られて、たとえば一方向の縦線だけであってもある程度座屈に耐えられると分かった。それに対し、一方向の縦線の模様は降伏耐力が大幅に下がった結果が得られた。

横と縦両方向に線がる十字型の模様のほうが、一方向だけ線がある模様より座屈耐力が強い傾向が見られた。これは、縦と横の方向にそれぞれ座屈に強い直線要素があるためだと考えられる。

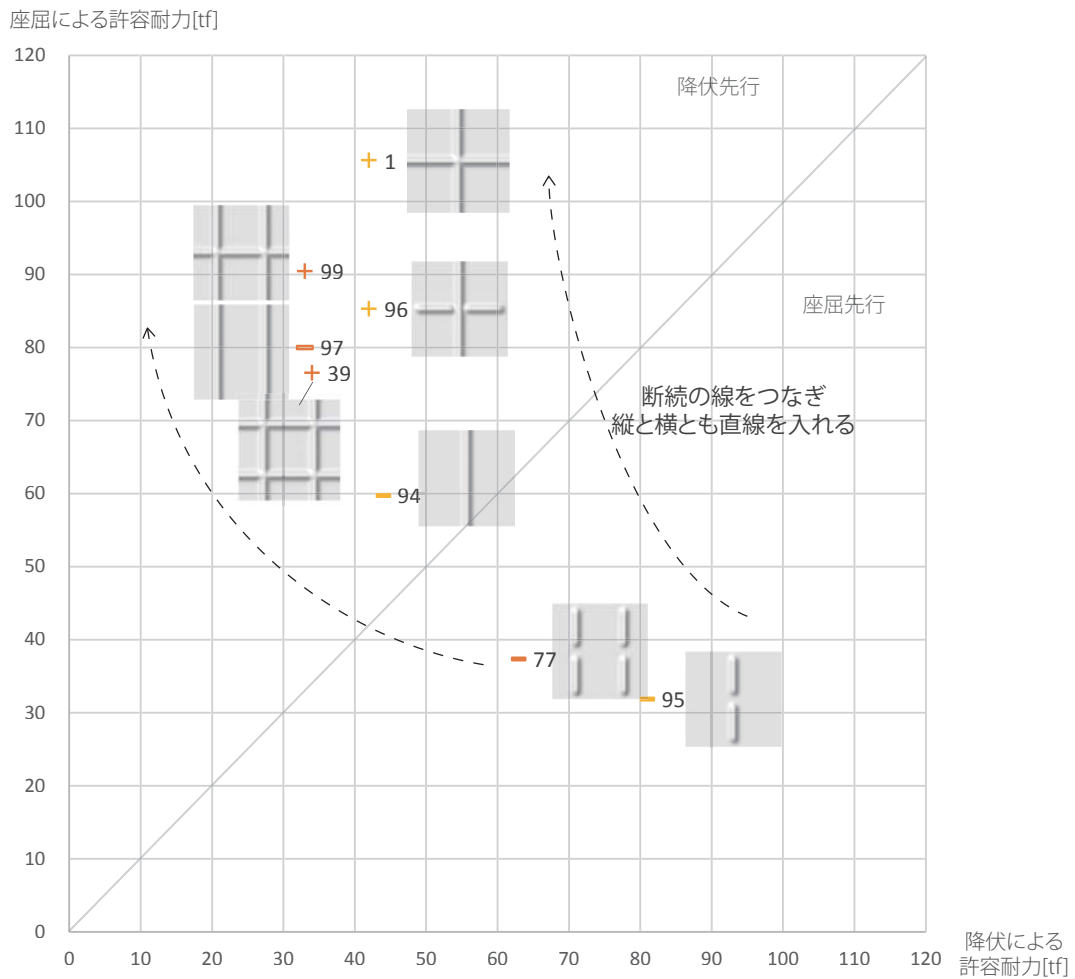


図 4.23 十字の線・上下連続の線・断続の線の模様の分布

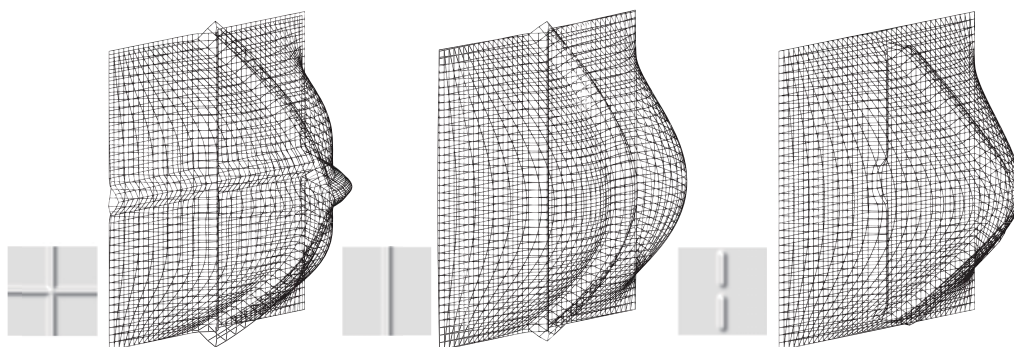


図 4.24 十字の線・上下連続の線・断続の線の模様座屈モード

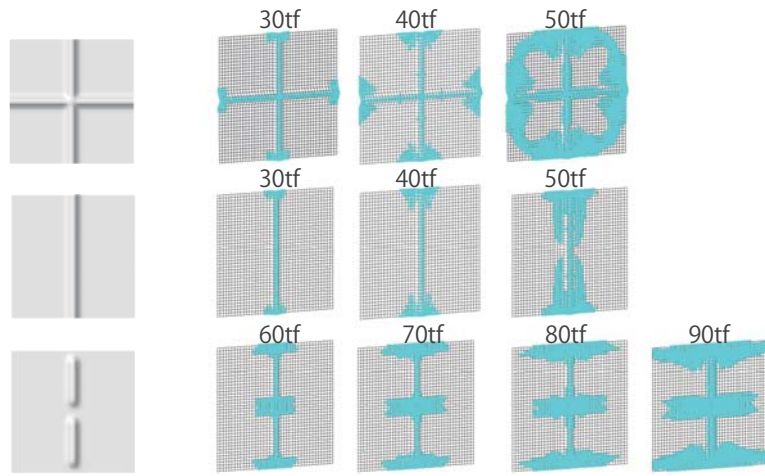


図 4.25 十字の線・上下連続の線・断続の線の模様の塑性ヒンジ図

本研究で描いた模様の中、十字型に近い模様が一番強い座屈耐力を持っている結果が得られた。これらの模様は模様 1 の純粋の十字模様と比べて、一番座屈しやすい板の中心部に、エンボスの面積を増やしたため、耐力が上がることと考えられる。

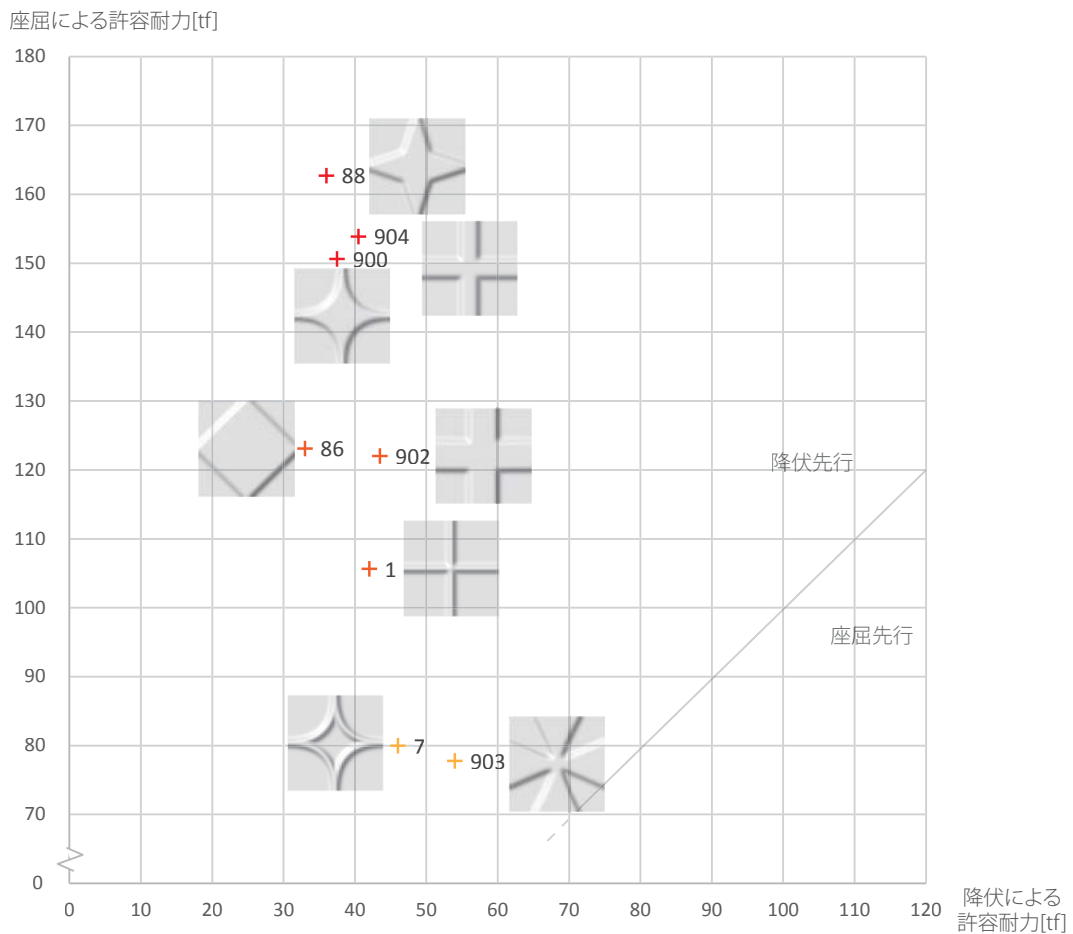


図 4.26 十字の模様の耐力分布

4.4 エンボス模様と力学の関係

カテゴリで得られた傾向を統合し、エンボス模様と耐力の関係は以下にまとめられる。

降伏・座屈とも強くなる：

斜めの線を縦横に変える

座屈のみが強くなる：

模様を細長くする（降伏が弱くなる）

分散的に模様を配置する（降伏が弱くなる）

模様のボリュームを増やす（降伏が弱くなる）

くい込みを増やす（降伏が弱くなる）

連続な直線を描く（降伏がほぼ変わらないか弱くなる）

降伏のみが強くなる：

小さい範囲で面の模様からその輪郭線による線の模様にする（座屈がほぼ変わらない）

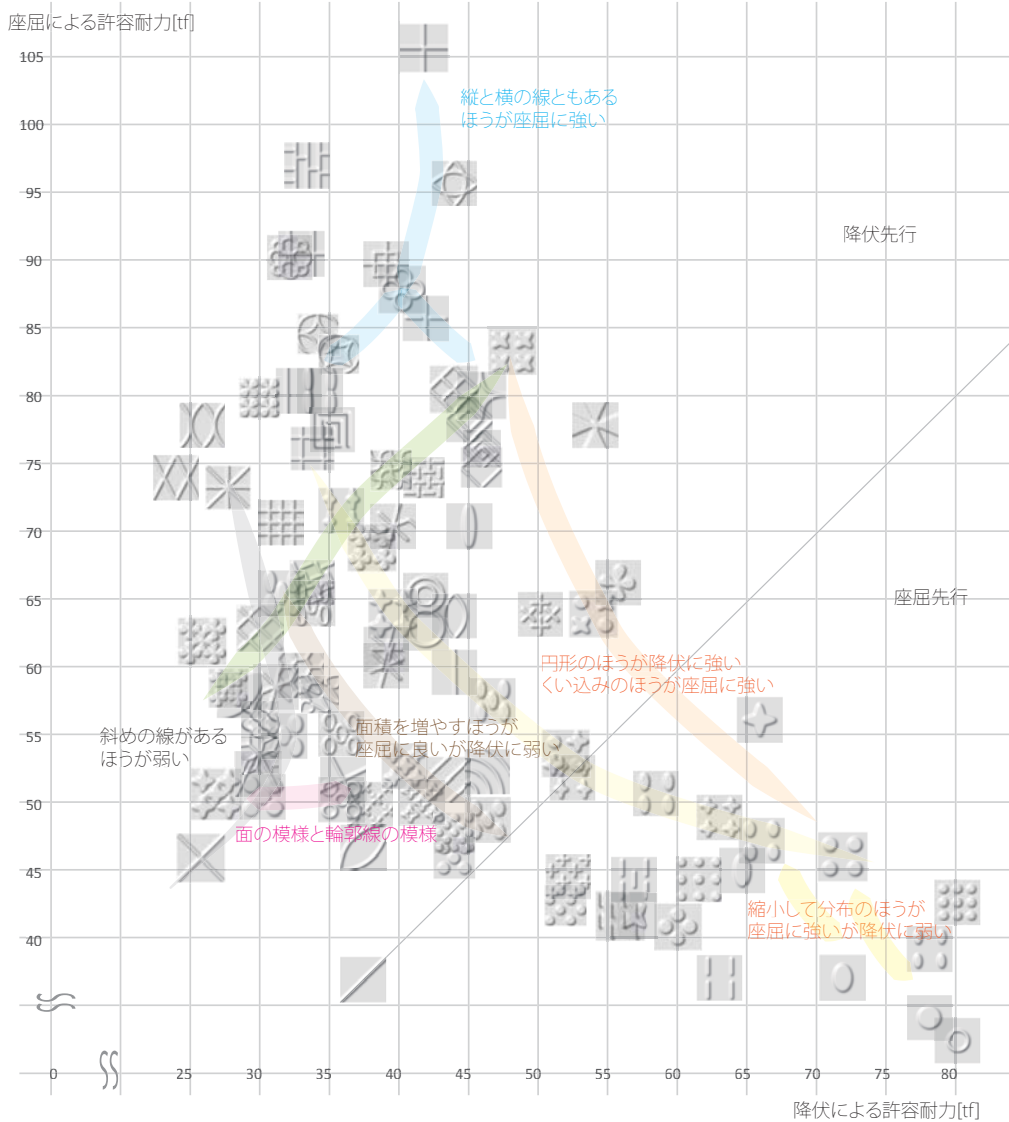


図 4.27 形態操作と耐力変化の関係

4.5 考察

本章には平板およびエンボスを施した薄板に、二軸方向に圧縮力をかけるときの解析を行い、降伏と座屈耐力についてプロットした。また、3章と同様にエンボス模様をテゴライズし、それぞれのカテゴリーの模様について特徴と力学の関係を調べた。

解析結果より、エンボス化した薄板は平板より座屈耐力が上がり、それによって耐えられる圧縮力が増えることになり、エンボスの意義が示された。

エンボスの模様について、一方向圧縮と同様に全体的に単純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、十字型に近い模様が一番座屈耐力が強かった。また、一方向圧縮のような降伏・座屈とも強い模様が本研究では見つからなかった。

エンボスの形の調整と耐力の変化について、降伏・座屈とも強くする手段が少なく、一方の耐力が上がるにつれて他方の耐力が下がる傾向が多く見られた。

以上のことで、二方向圧縮を受けるエンボス模様の力学の挙動を示した。

第 5 章

実験

提案した手法の妥当性を検討するため、2つの模様を選び、試験体を試作し、一方向圧縮の実験を行った。本章では実験について記述し、また実験結果と試験体の解析結果を比べることによって解析手法の正当性について考察する。

5.1 実験概要

5.1.1 実験目的

本研究で提案した解析手法の妥当性を検討するため、エンボスを施した薄板を制作し、長手方向の圧縮実験を行った。

5.1.2 パラメータの設定

(1) 材料

実験では 0.3mm 厚の銅板を採用した。銅板にした理由は、銅板などの金属板より加工が比較的容易で、アクリルなどの樹脂系の板に比べて塑性能力を持ち、塑性後の挙動も調べられるためである。

実験で使った銅板は JISC1220 である。試験機の都合上、本研究では材料試験を行わず、銅板の材料試験を扱った既往研究^[18]より銅板の材料特性を採用する(表 5.1)。

表 5.1 実験用銅板の材料情報

ヤング率	ポアソン比	降伏強度	最大強度
125GPa	0.349	135MPa	235MPa

(2) 寸法

加工難易度を考慮し、実験では試験体のサイズを 400*240*0.3mm にし、最大のエンボスのデプスを 20mm にした。2.1 節で挙げたエンボスのアルゴリズムを用いて、またエンボスの断面が図 5.2 に示す。

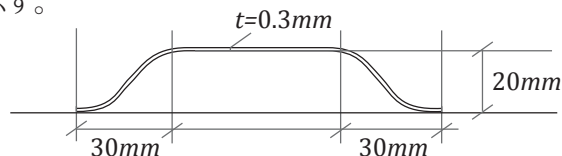


図 5.2 実験用銅板の材料情報

(3) 模様を選定

下記の 2 つの模様を選び、それぞれ「花模様」と「月模様」と名付ける。

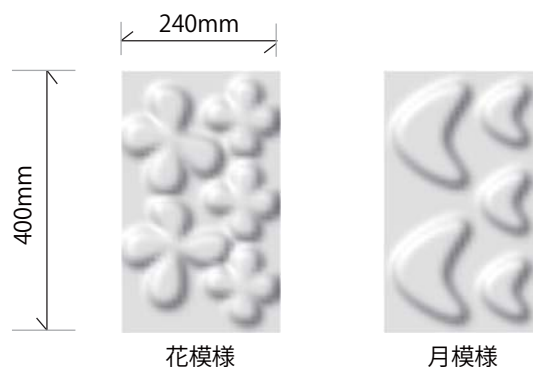


図 5.3 実験用模様

(4) 荷重条件

ある程度大きな座屈耐力のほうが、現象の観察によいため、実験では試験体を両端固定支持にして、上から一様分布の荷重をかけるものにする。

5.2 実験方法

平板の銅板から枠に沿って叩いて試験体を制作し、そして3D スキャナーで試験体をスキャンしてデータとして残し、その後に加力の実験を行う。

5.2.1 試験体の製作

選定した模様から3Dモデルを作成し、図5.4のように等高線でスライスした形をレーザーカッターで切り、試験体の枠を作った。エッジの部分は紙粘土で滑らかに整形し、その上に雑巾を敷く。

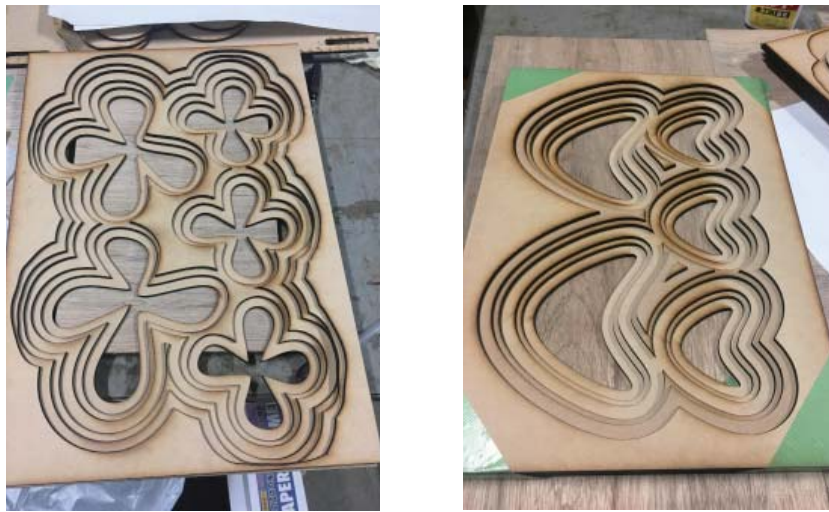


図 5.4 レーザーカッターで切り出した試験体の枠

枠に平らな銅板を敷き、ハンマーで叩く。なるべく滑らかな形を作るように工夫する。



図 5.5 製作した銅板模様

5.2.2 試験体の 3D スキャン

後により精度のよい解析モデルを作るために、圧縮実験をする前に試験体を 3D スキャナー (iSense 3D scanner^[19]) でスキャンした。図 5.6 は 3D スキャンで得られた花模様と月模様のデータを示す。



図 5.6 3D スキャンしたデータ

3D スキャナーの精度によるエンボスのデプスの誤差を少なくするように、スキャンされたモデルに対してスムージング操作を行った。実験で使う 3D スキャナーの精度は 0.9mm であるため、モデルの各点のデプスは図 5.7 のように、その点と、周囲 1.0mm の距離を空けた 4 点のデプスの平均値とした。

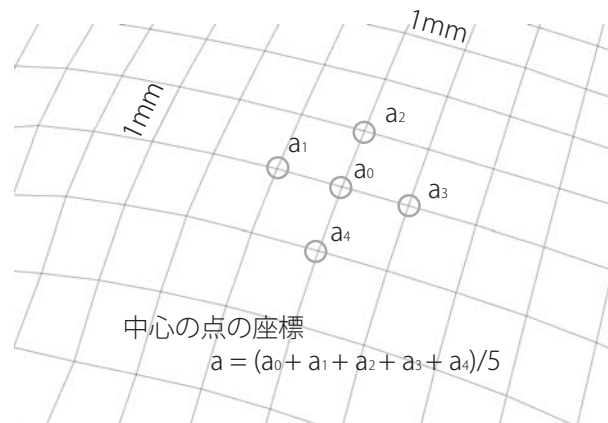


図 5.7 スムージング操作

図 5.8 は花模様と月模様に対して、スムージングする前と後のモデルを表す。スムージング操作を施したモデルに基づき、後で解析モデルを作成する。

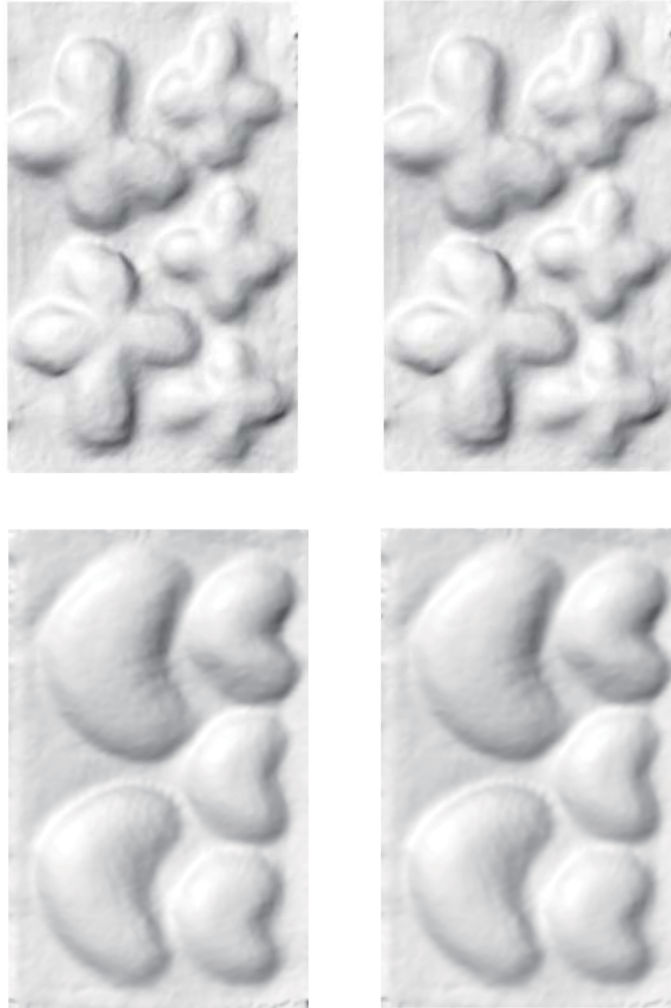


図 5.8 スムージングする前 (左) と後 (右) のモデル

5.2.3 セットアップ

図 5.9, 5.10 のように試験体をセットアップする。変位計 1 で圧縮方向の変位を測定し、変位計 2 で面外の変形を測定する。

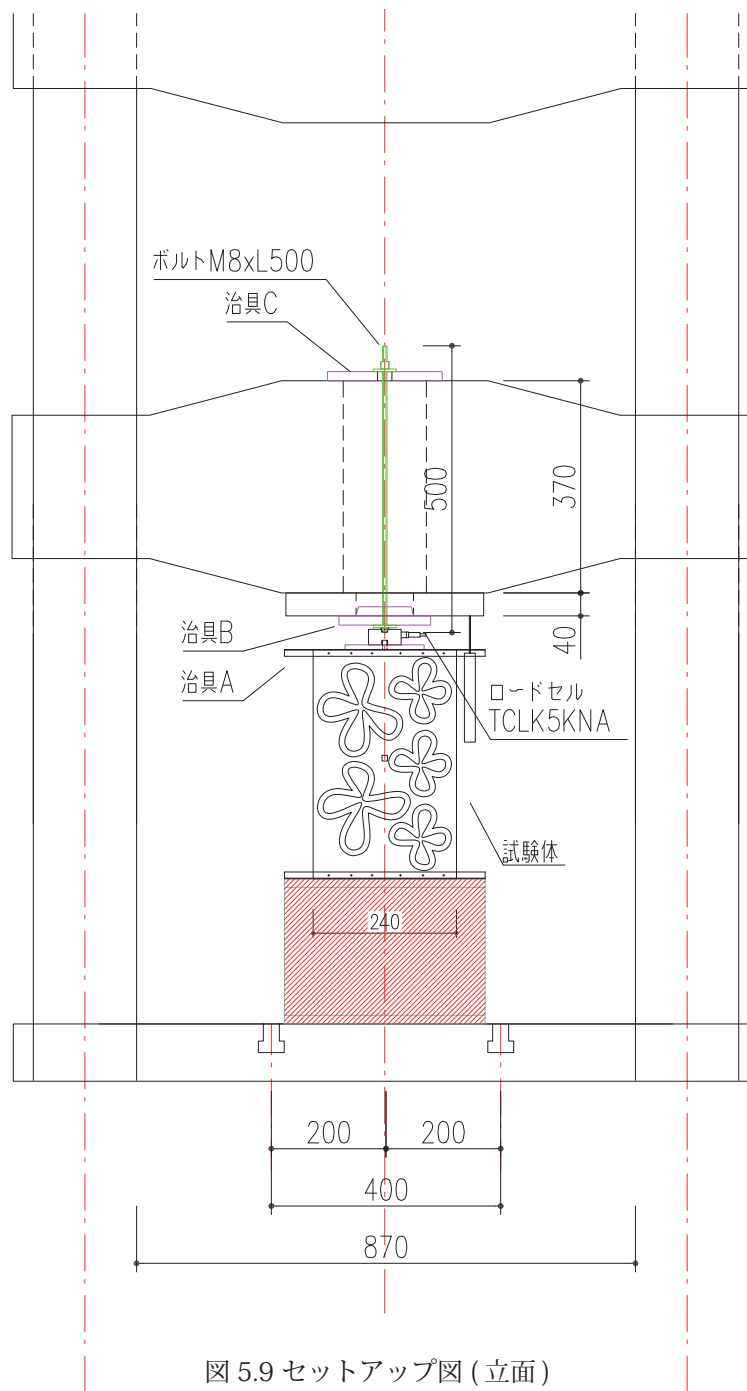


図 5.9 セットアップ図 (立面)

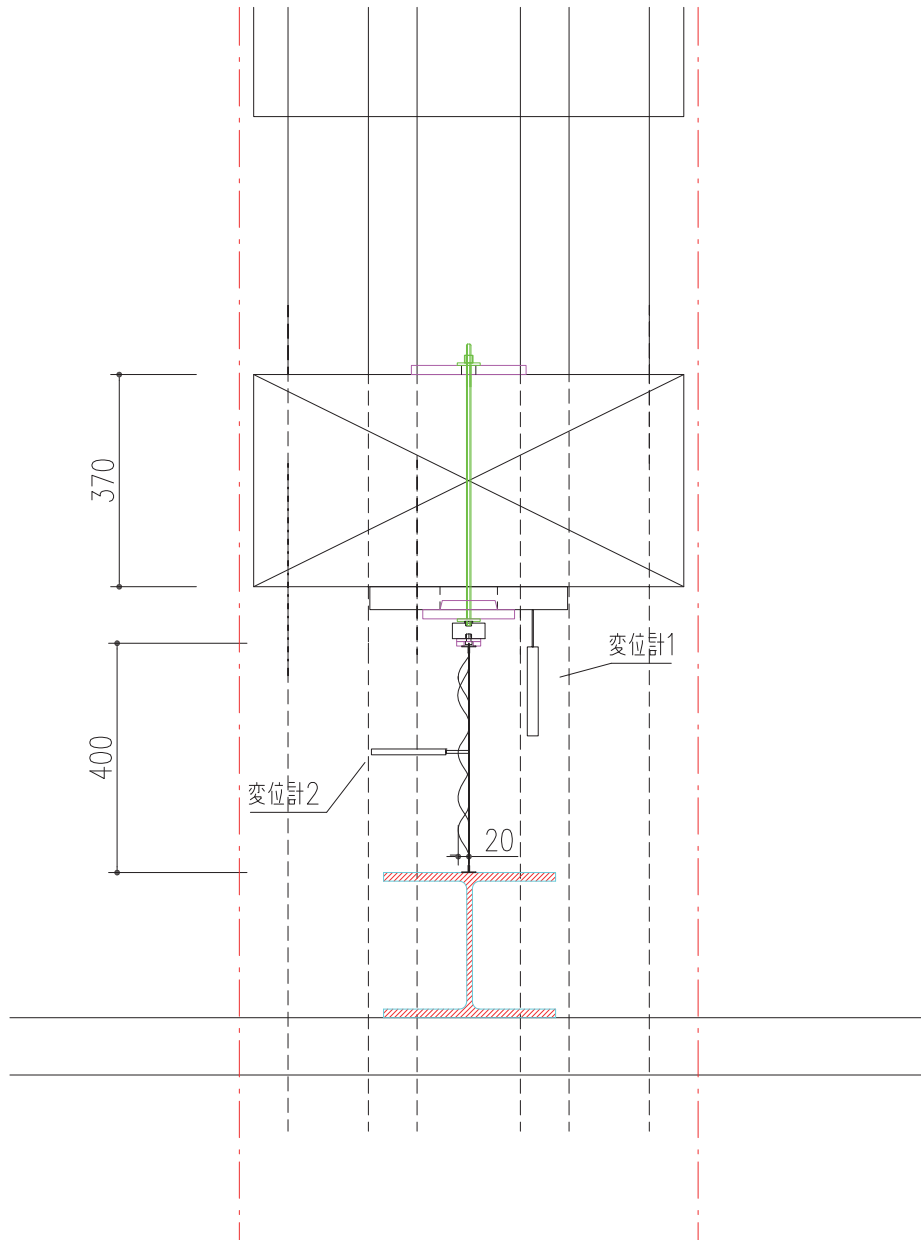


図 5.10 セットアップ図 (側面)

図 5.11 に示すようにひずみゲージを貼る。なお、奇数番号のひずみゲージは試験体の凸の面に貼り、偶数番号のゲージは凹の面に貼る。2 体の試験体とも、ひずみゲージ 03, 04, 05, 06 は模様の中のところ、07, 08 は模様の傾斜のところ、そのほかは模様の中の谷のところに配置される。

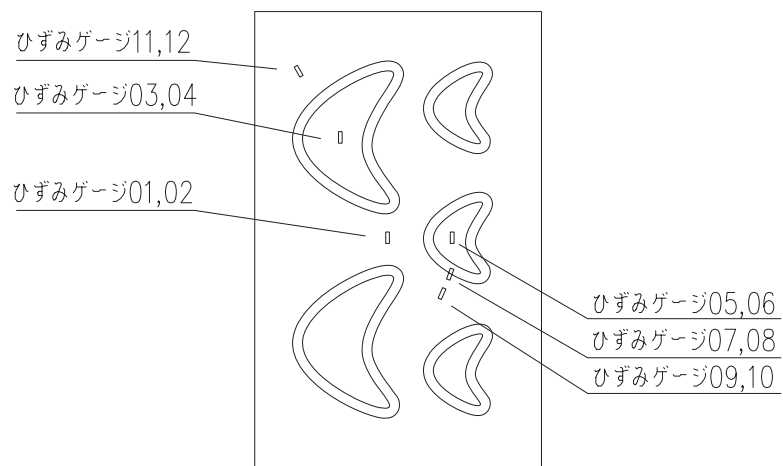
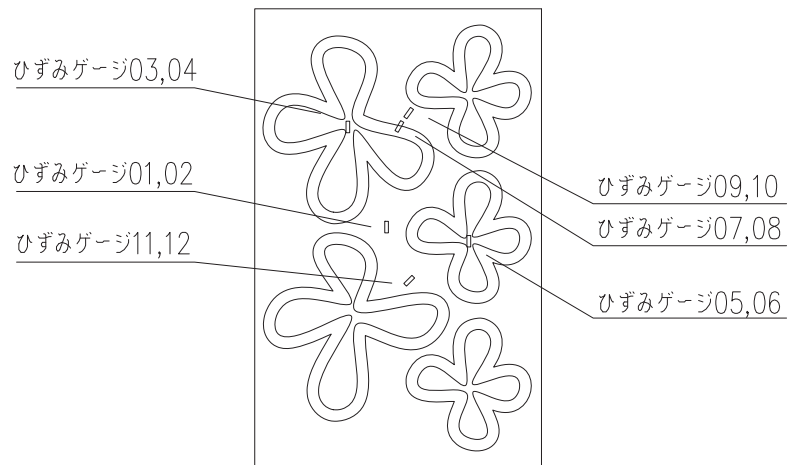


図 5.11 ひずみゲージの位置

5.2.4 実験様子

花模様と月模様の実験時の様子を図 5.12 に示す。

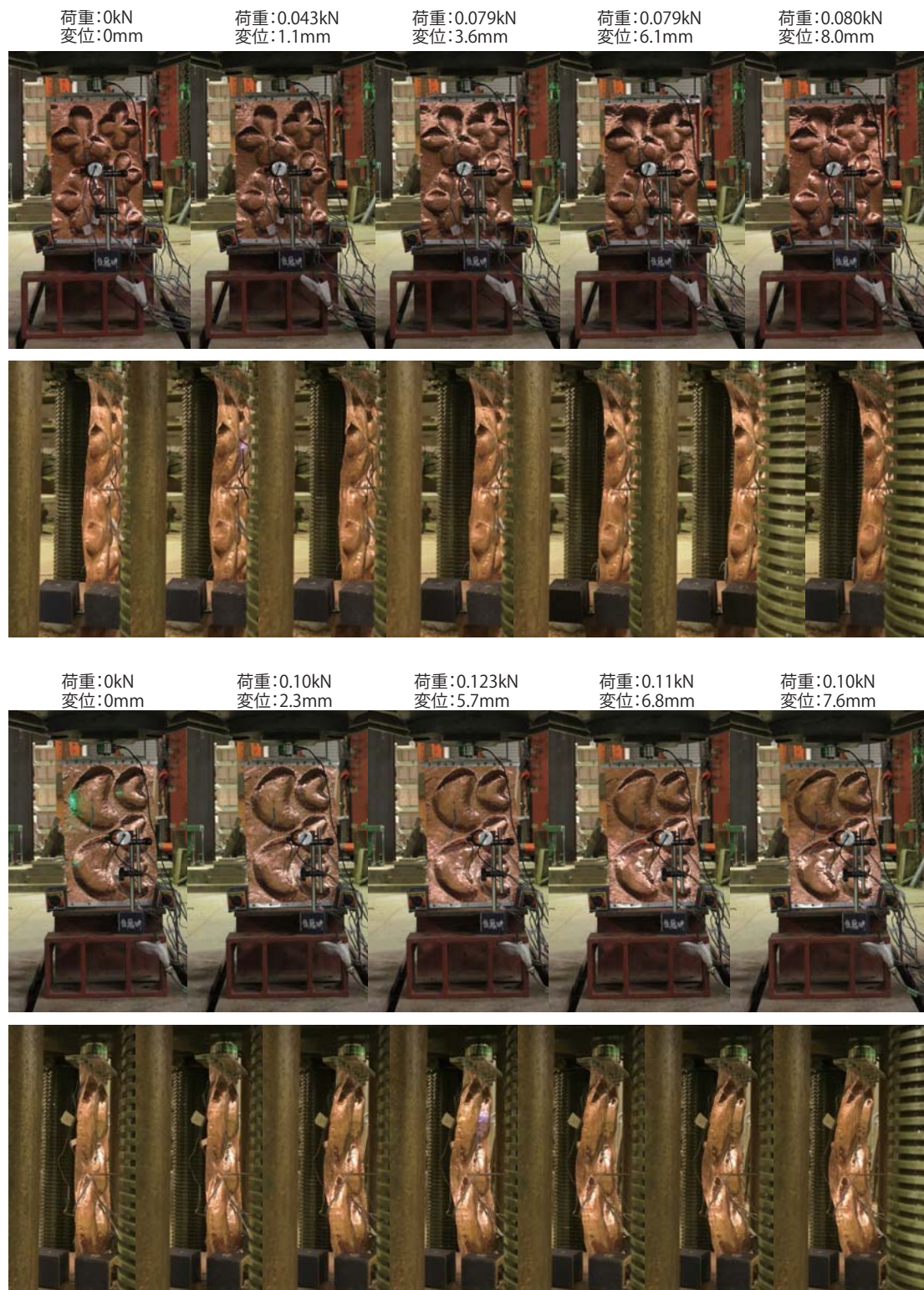


図 5.12 実験写真

5.3 実験結果

花模様の試験体は最大耐力 0.0826kN に達したに対し、月模様は 0.126kN に達した。2つの試験体ともくしゃくしゃにつぶれることが起きず、座屈した現象が起き、また月模様については強度が下がった現象が見られた。図 5.13 は試験体の圧縮方向の変位で、図 5.14 は試験体の中央部の面外変形を表す。

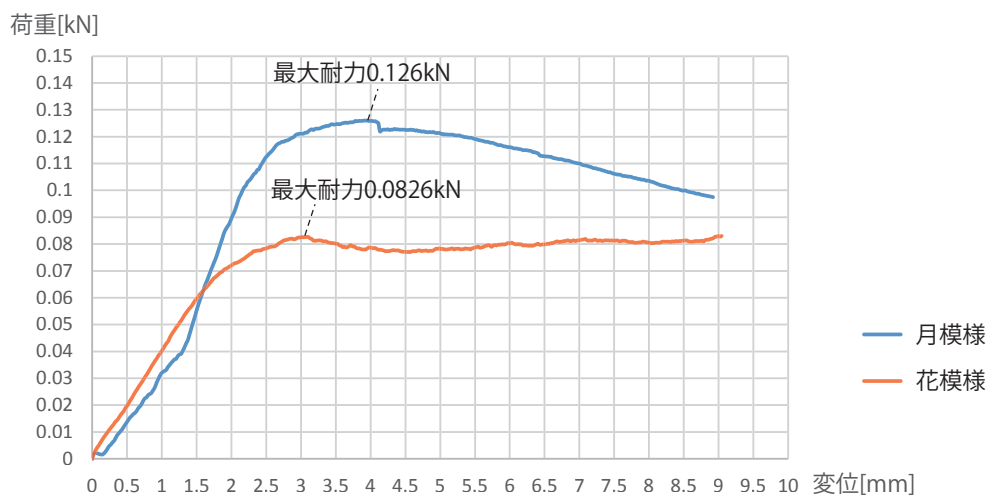


図 5.13 試験体の圧縮方向における荷重変形曲線

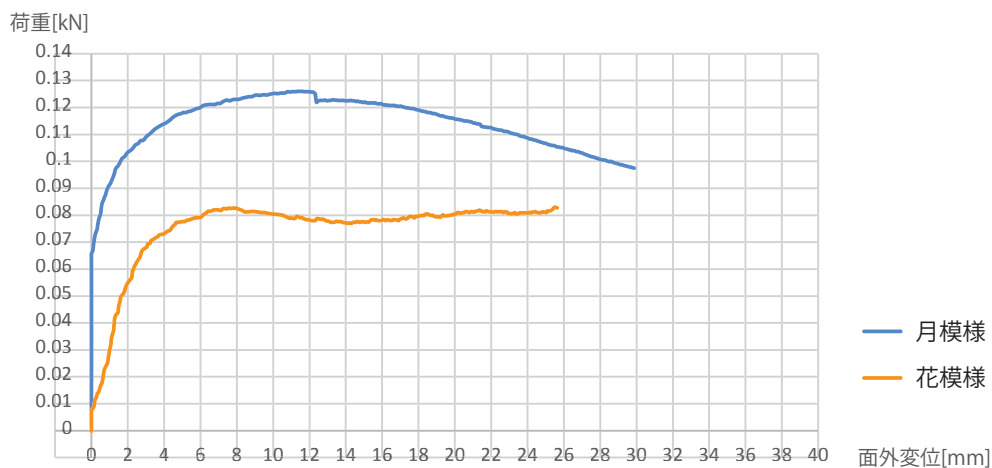
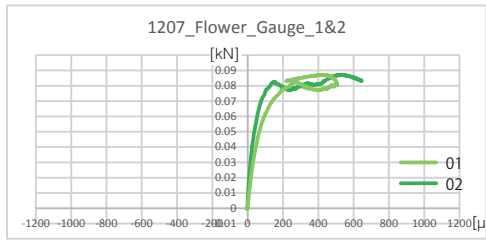


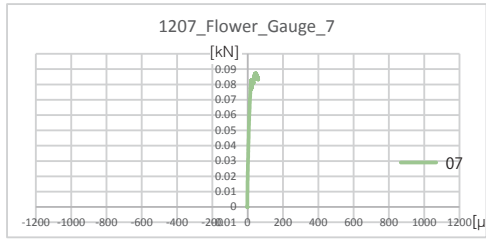
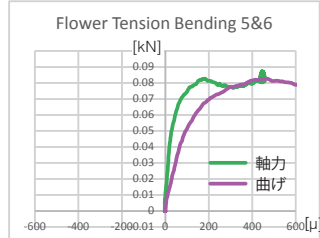
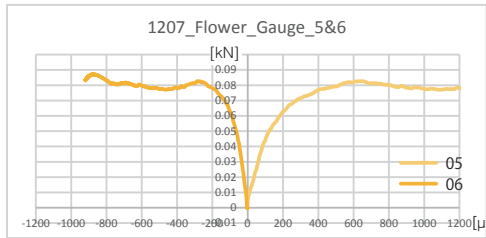
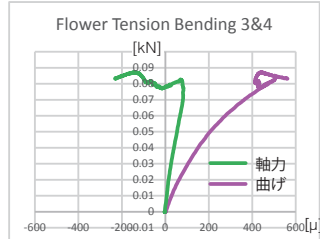
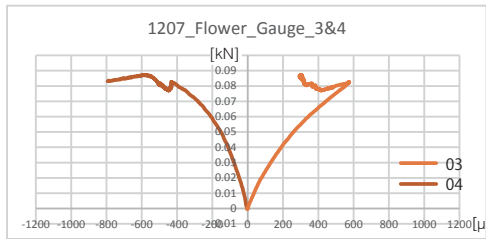
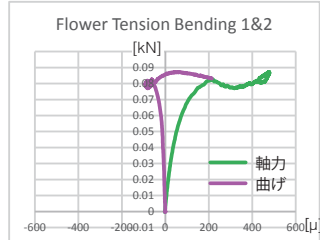
図 5.14 試験体の面外における荷重変形曲線

ひずみゲージを貼っていた箇所のひずみ曲線を花模様では図 5.15、月模様では図 5.16 に示す。なお、引張は正であり、また軸力が試験体の表と裏のひずみの和の 1/2、曲げが表と裏のひずみの差の 1/2 より算出される。花模様の試験体の山・谷とも大きな曲げが発生したことが見られた。月模様は全体的に花模様より応力が小さいが、谷のところに曲げが見られた。軸力について、何箇所引張力が検出されたが、これは圧縮によって板が面外に凸の状態、部材が伸ばされたと考えられる。

測ったひずみ



軸力と曲げに分けたひずみ



※ひずみゲージ08はデータなし

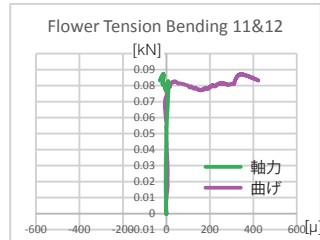
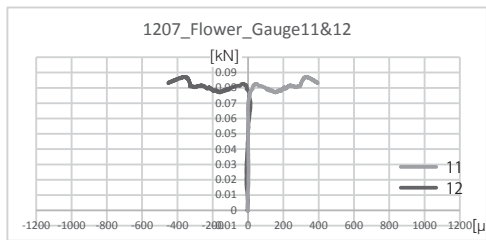
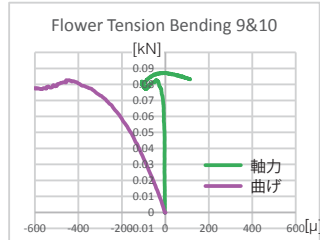
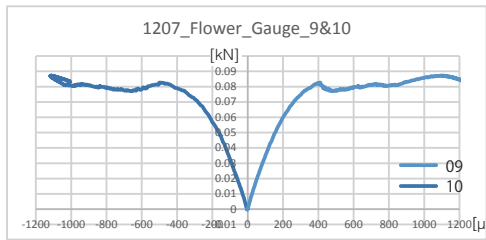
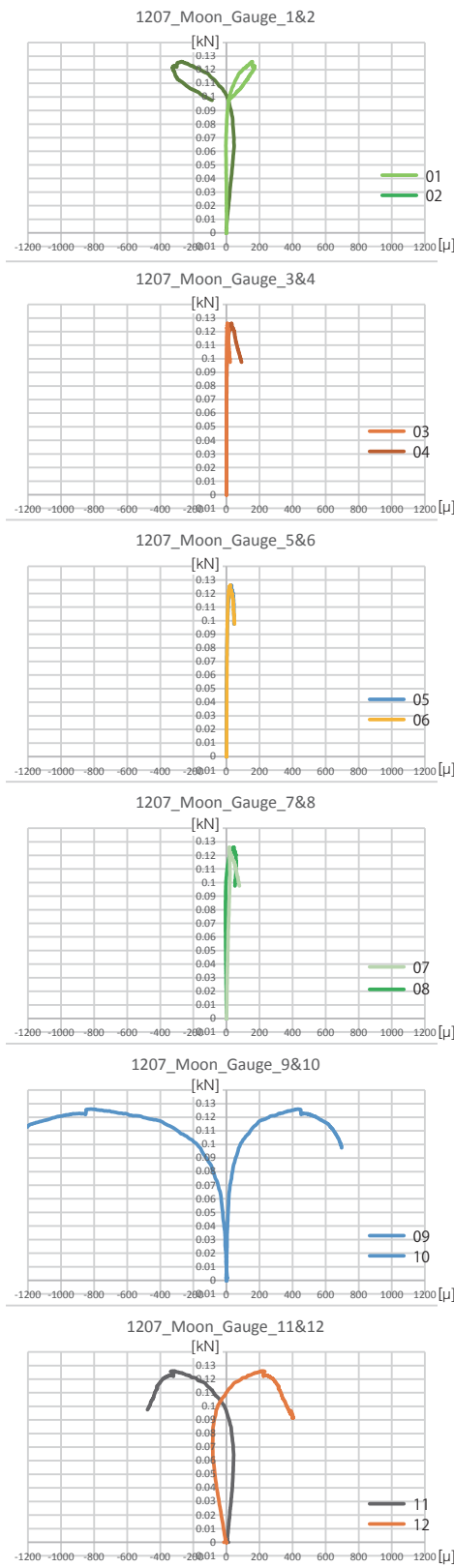


図 5.15 花模様のひずみ曲線

測ったひずみ



軸力と曲げに分けたひずみ

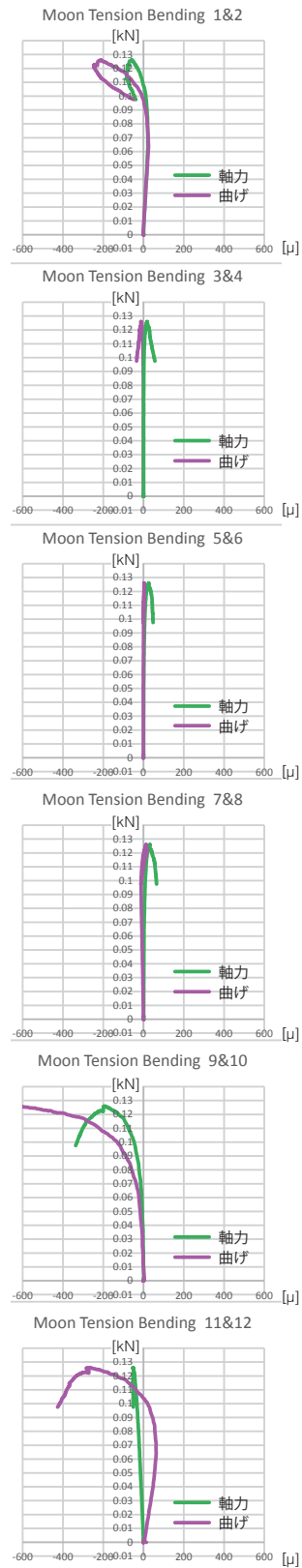


図 5.16 月模様のひずみ曲線

5.4 試験体の解析

5.4.1 解析モデル

(1) 位置情報

5.2.2 節で得られたモデルに基づき、50 マス *30 マスのメッシュの線材で近似した解析モデルを作成する。

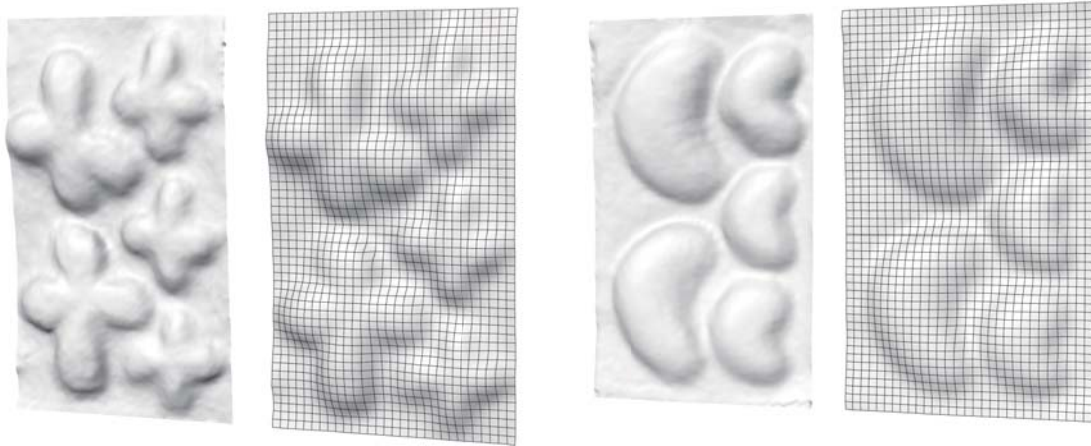


図 5.17 スムージング後のデータと解析モデル

(2) 断面情報

叩いた銅板は薄くなったため、試験体の厚みについて何箇所実測し、図 5.18 に示す。なお、叩く前の板厚の実測値は 0.30mm である。

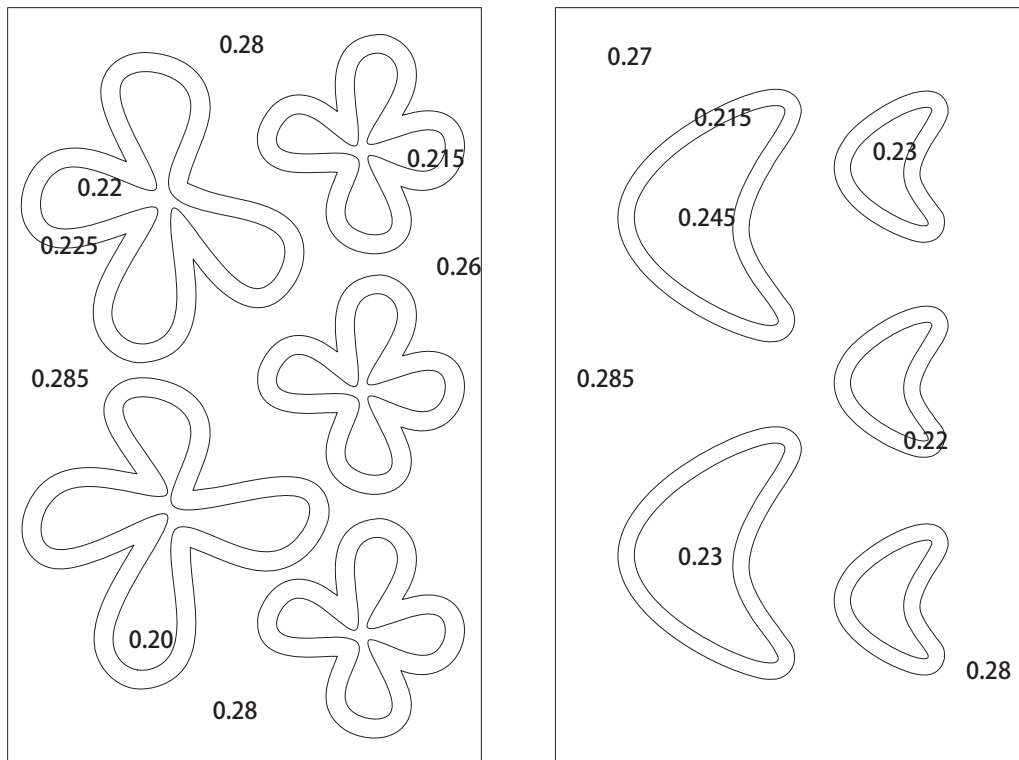


図 5.18 試験体の厚みの実測

実測値の平均を取り、花模様試験体については近似的に、起伏が激しいところの部材の厚みを 0.215mm、ほとんど起伏がないところの厚みを 0.280mm とした。月模様試験体について近似的に、起伏が激しい「月」の模様のエッジ近くの厚みを 0.215mm、起伏が緩やかな「月」の模様の中央の厚みを 0.235mm、ほとんど起伏がないところの厚みを 0.280mm とした。

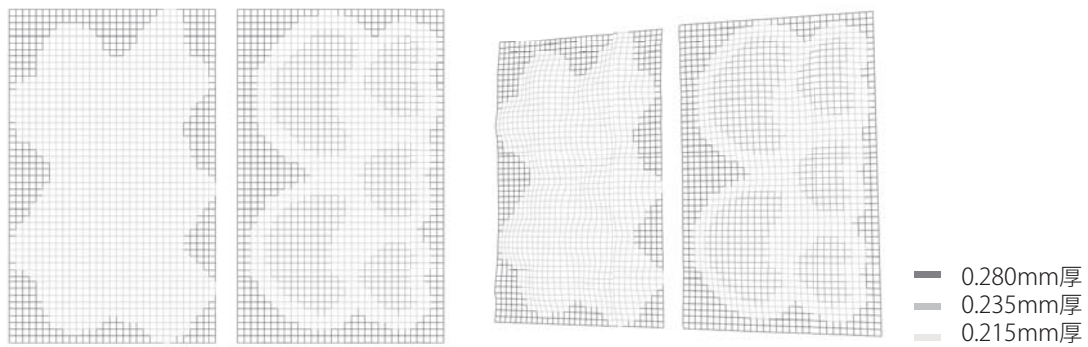


図 5.19 厚み分布

(3) 荷重条件

実験と同様に、試験体を両端固定支持とし、自重および上から一様分布の荷重をかけ、荷重増分解析と座屈解析を両方行った。

なお、座屈解析について、試験体の実際に耐えられる座屈耐力を知るために、設計用の安全係数をかけなく、座屈解析で得られた座屈荷重のままが、試験体の座屈耐力になる。これは 2 章で提示した設計用の許容耐力と区別して扱う必要がある。

5.4.2 解析結果

花模様が 0.170kN で降伏し、0.1790kN で座屈する。これに対し、月模様は 0.270kN で降伏し、0.2251kN で座屈する。それぞれの模様の荷重変形曲線は図 5.20 に示し、また模様の塑性化のプロセスを図 5.21 に示す。

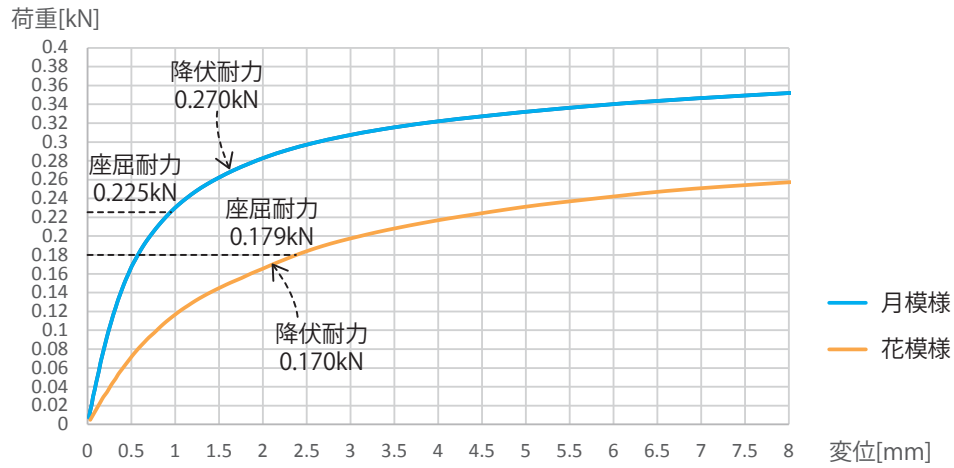


図 5.20 解析における荷重変形曲線

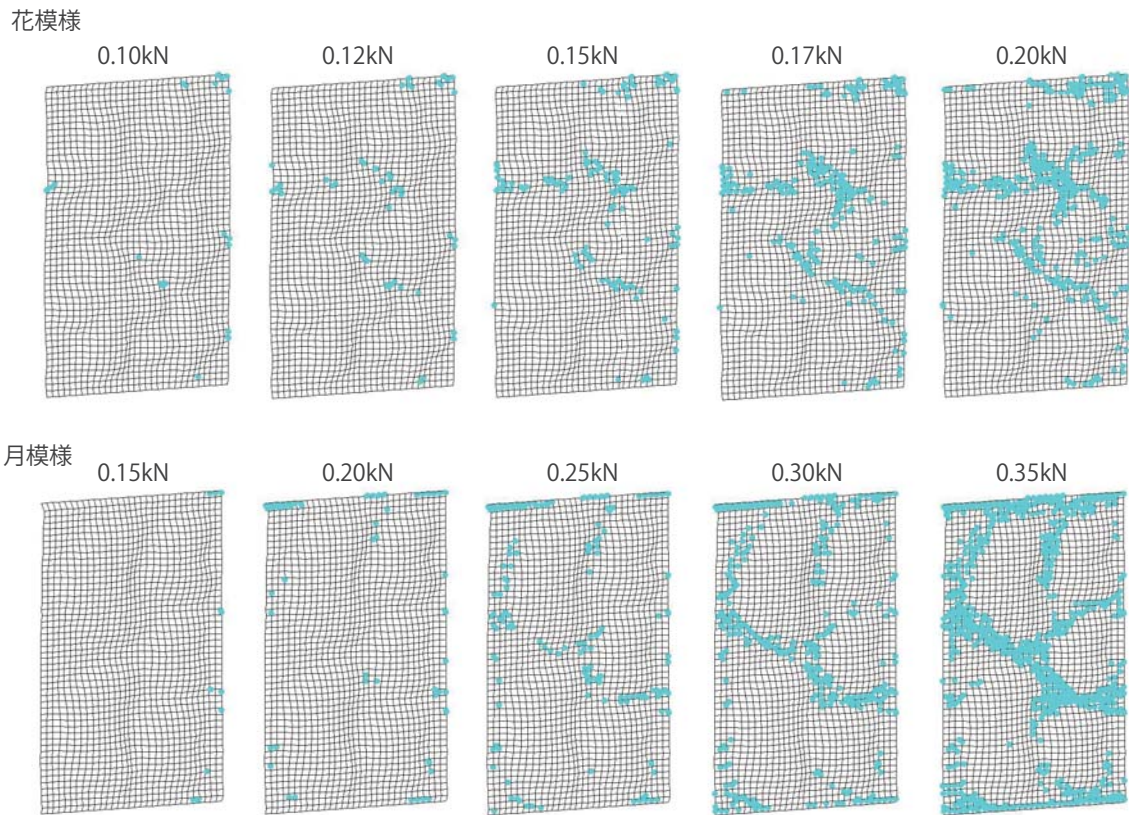
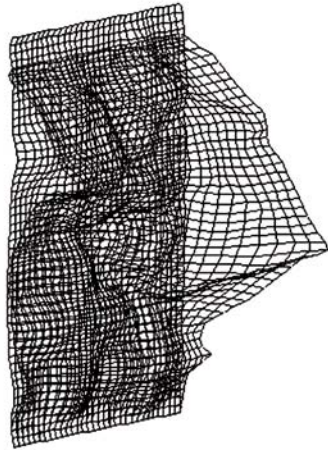


図 5.21 花模様と月模様の塑性ヒンジ図

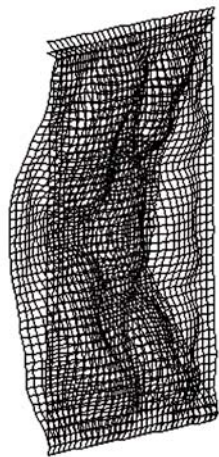
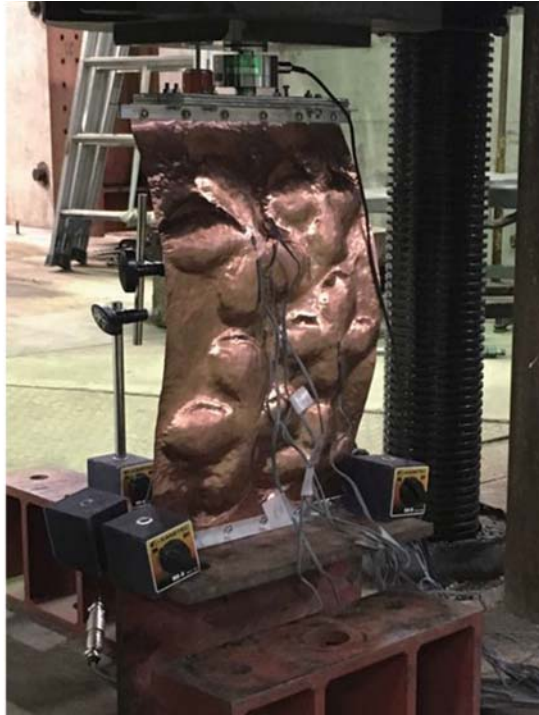
5.5 考察

(1) 変形モード

二つの模様とも、実験の変形と似たような変形モードが解析で得られた。また、月模様が花模様より耐力が大きいことが実験でも解析でも見られた。



変形図
表示部材：柱、梁、ブレース、壁、床



変形図
表示部材：柱、梁、ブレース、壁、床



図 5.22 花模様と月模様の変形モード

(2) 降伏・座屈耐力

降伏と塑性化について、実験にはどの時点で降伏したかを判断するのが難しいため、荷重変形曲線を基準として解析と実験結果を見比べる。花模様も月模様も実験値が解析値の40%程度の曲線を描くことが分かった。

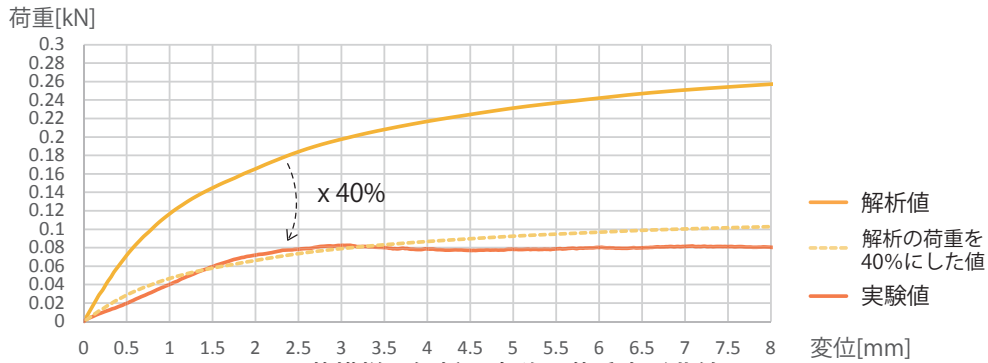


図 5.23 花模様の解析と実験の荷重変形曲線

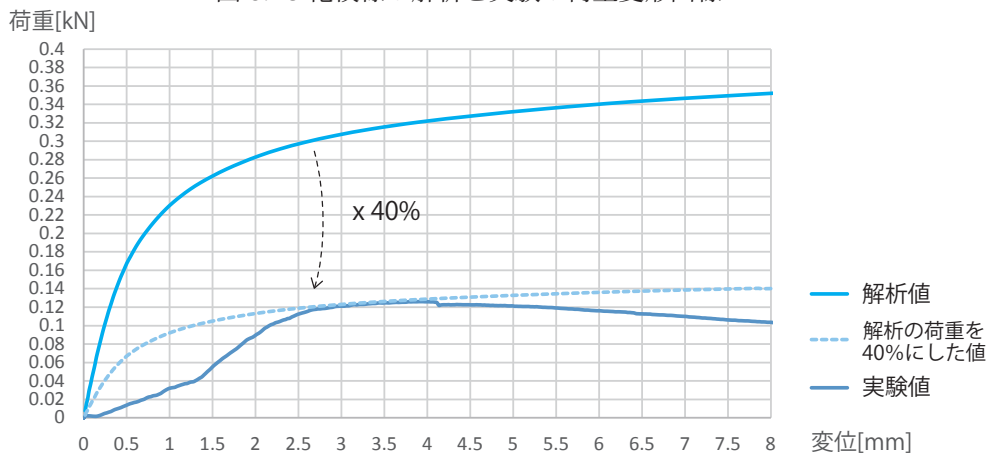


図 5.24 月模様の解析と実験の荷重変形曲線

また、解析における座屈耐力を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、概ね実験の座屈荷重と捕えてよい値と見ることができる。

表 5.25 座屈解析の40%の荷重

	座屈解析荷重 [kN]	解析の40%にした荷重 [kN]
花模様	0.179kN	0.072kN
月模様	0.225kN	0.090kN

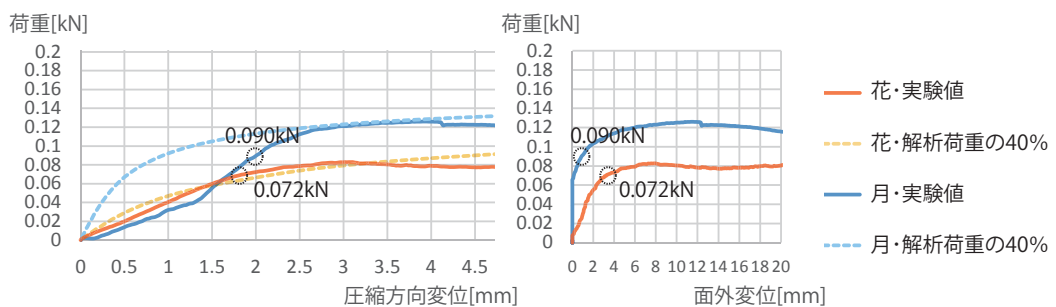


図 5.26 座屈荷重の照らし合わせ

(3) 解析の検討

2つの模様は座屈・降伏耐力とも、解析値の40%前後が実験値に近い結果となった。この割合の理由として、実験の誤差のほか、モデル化にするときの線材の有効幅が大きく関与すると考えられる。

本研究では一方向圧縮の板をメッシュの線材でモデル化するとき、平板の面外剛性に合わせるように線材の有効幅がピッチの100%で統一した。負担幅がピッチの100%であることは、平板の場合、モデルの横材が応力を負担せず、縦材がすべて負担することと意味する。一方、有効幅が100%にすれば、モデルの面積が実際板の面積の2倍になり、過剰になりうる。実験で扱った試験体は、模様が入ることによって横材にも応力が生じるため、有効幅を概ねピッチの40%とすることが望ましいことが分かった。

座屈・降伏耐力とも解析値の40%が実際に近い結果になるため、3章の様々な模様に対してプロットしたグラフは、座標軸が同じ倍率で縮小するにもかかわらず、模様の分布の様子・降伏か座屈かに関する挙動がほとんど変わらないといえる。なお、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。

第 6 章
結

6 章 結論

6.1 まとめ

各章で得られた知見を以下に記し、本研究の結論とする。

2 章では、薄板を線と面の模様でエンボスを施すアルゴリズム、モデル化および増分・座屈解析の手法、降伏と座屈による許容耐力を総合的に考慮する方法について考案した。このことによって、エンボス模様が圧縮荷重を受けるときの挙動を評価する方針を構築した。

3 章と 4 章では、それぞれ一方向圧縮と二方向圧縮が作用する場合の、エンボス模様の降伏・座屈耐力について解析し、模様と力学の関係を分析した。エンボス化した板が平板より大きい耐力を持つことが検証され、単純な面・複雑な面と線・単純な線の模様でエンボスを施すときに模様の強度分布状況が明らかになり、またエンボス模様をどう操作すれば降伏・座屈または両方の耐力が上昇するかについて示した。このことで、エンボス模様を扱うときのデータベースを設立し、模様と強度の傾向を提示した。

5 章では、エンボス模様の試験体を試作し、一方向圧縮の実験を行い考察した。降伏・座屈とも、解析結果のおよそ 40%が実験結果と近いとのことで、解析手法の見直し方について示した。

以上より、本研究は塑性化と座屈を考慮したエンボス模様の評価手法を提案し、模様と力学の特徴を関連付けた。本研究によって最適化のための評価方針が立てられ、局所の形態と構造との関係が示され、局所形態創生へヒントすることが可能となる。

6.2 今後の展望

今後の展望について、以下のことが考えられる。

(1) エンボスのフラクタル的な表現

本研究では、平らな薄板よりエンボスを施したもののほうが耐力が大きいことを検証した。この考え方から一歩進むと、エンボス模様さらにエンボスを施したほうが、もっと強くなるだろう。このようなフラクタル的にエンボスを施すアルゴリズムと力学の特徴について調べることが期待される。本研究では解析スピードの制限のため行われなかったが、今後により細かくモデルを分割すれば、フラクタルの操作ができると考えられる。

(2) 機械学習による模様の特徴抽出

本研究はエンボスの幾何学特徴を調べる初期の研究のため、手探りの状態で研究を進んだ。なるべく広範囲でのエンボス模様を作り、そして極力模様の分類を行い、考察することに努めたが、どうも「人間の判断」に頼ることが存在する。本研究で提案したエンボス模様の評価手法に基づき、今後コンピュータによる模様の生成・強い模様の特徴抽出が課題である。

例として、模様と本研究の解析法で解いた耐力のデータをベースに、ニューラルネットワーク (NN) で耐力が強い模様のノードを抽出するプログラムが考えられる。または遺伝的アルゴリズムを用いて、モデルの各点座標を遺伝子として入力し、最優の強度を出すモデルを自動的に生成するプログラムが考えられる。いずれの手法も、できるだけ人間による操作を少なくし、統計ベースなどでより客観的に模様と力学の関係がつかめられるといえる。

(3) 解析モデルの再検討

本研究では実験で得られた耐力が解析の 40% となった。試験体の個数、制作と加力の精度などによる誤差を今後の実験にゆだねる一方、解析モデルについて今後再度検討したい。メッシュ状のモデルについて、もし模様ごとに有効幅が違う場合には、模様と有効幅のおおよその関係をつかむことが今後の課題となる。もしくは、メッシュ状のモデルと、斜め材が入ったメッシュのモデル・有限要素法を用いた板材のままのモデルの精度を比較することによって、モデル化の手法を改善することが可能となる。

(4) 荷重条件の多様化

本研究では長方形板の一方向圧縮と、横と縦の荷重比が 1:1 のときの正方形板の二方向圧縮を行った。板の座屈も、降伏後の塑性域も、二方向に受ける荷重に比例して挙動が変わるわけではないので、二方向圧縮における荷重比を何種類か変えて調べる必要がある。このことによって、エンボス模様による局所の最適化が様々なグローバルな形に対応でき

ると考えられる。

たとえば横と縦の荷重比が $-1:1$ の関係であれば、板が一方向圧縮で一方向が引張を受ける状態である。これは図 6.1 のように全体形状がドームで上から荷重を受ける場合の、ドームの下部の挙動に近いので、ドームの下部の局所最適化の参考になれる。一方、ドームの頂上は本研究で行った荷重比 $1:1$ の板の挙動に近いので、本研究の結果を参考に設計を行う。このようにドームの局所最適化が可能となる。

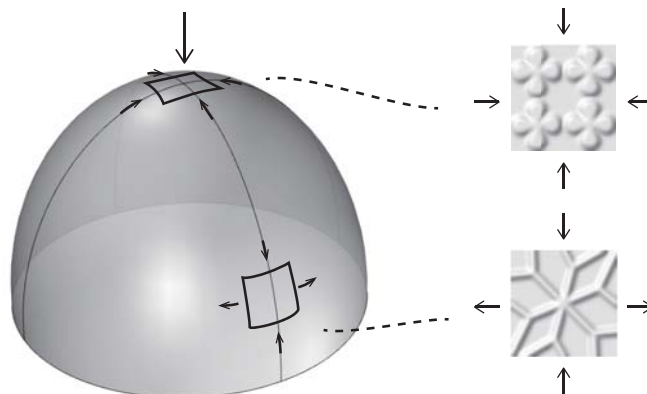


図 6.1 多様な荷重条件とその応用

(5) 模様の変形能力と必要耐力の関係

材料が大きな変形能力を持つ場合に、耐力が小さくても地震時にエネルギーの吸収ができる。例として、図 6.2 のように B が A より変形能力があるため、耐力が小さくても A と同じエネルギーを吸収する。本研究での解析と実験とも、模様によって変形能力が大きい現象が何度か見られた。今後、それぞれの模様のモデルについて変形能力とそれに応じる必要耐力の関係を調べ、大変形時の挙動を考察することが課題として考えられる。

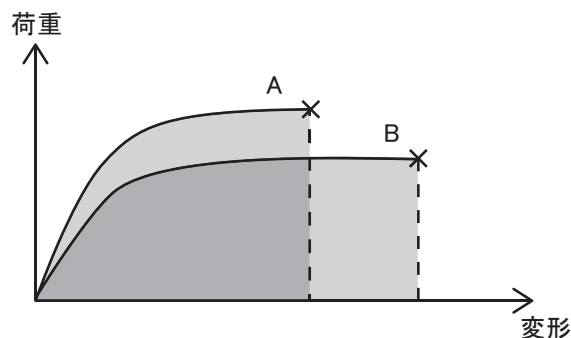


図 6.2 変形能力と必要耐力の関係

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にお世話になりました。ここで感謝の意を申し上げます。

指導教員である佐藤淳先生には、大変お忙しいにもかかわらず可能な限り時間をとっていただき、解析から実験まで道筋を導いていただきました。食事中にティッシュにダイアグラムを書いていただいたとき、帰り道の電車で文章の構成について相談を載せていただいたとき、夜の地下実験室で銅板叩きを手伝っていただいたとき…振り返ってみて様々な場面で先生に熱心にご指導をいただきまして、とても感謝しております。

佐藤研究室の荒木美香さんと古市渉平さんには、解析ソフトの使い方の説明や実験の準備など大変サポートをいただきました。時間にかかわらず何か質問があるときにすぐに丁寧にご教えていただき、いろいろと勉強になりました。また佐藤研究室のジョインさんに、何回も解析関連の悩みごとについてアドバイスをいただき、安心して論文を書くことができました。

副指導の佐久間哲哉先生、構法系の清家剛先生、藤田香織先生、権藤智之先生に、構造設計と少し違う立場からいろいろご意見をいただきました。論文のつじつまを整理するために大変助かりました。

佐藤研究室の学生の皆さま、お世話になりました。澁谷達典さんに文章のフォーマットについて教えていただき、堤千春さんと西村裕哉さんに論文進捗に関する励みをいただき、そして張耕嘉くん、朝原真知子さん、河村京介くん、大霜潤也くん、高岡俊一郎くん、藤本月穂さん、宮本健太くんに、試験体の制作および実験に手伝いをいただき、小島慎平くんにプログラムの勉強を励んでいただきました。

小淵研究室に、レーザーカッターおよび 3D スキャナーを使わせていただき、おかげさまでより正確な実験データが得られました。

他に身の回りの友人、建築の先輩と後輩たち、遠くにいる家族に精神的な支えをいただきました。名を全部挙げられないですが、かかわってくださったすべての方々に感謝の念を申し上げます。ありがとうございました。

2018 年 1 月末 於本郷

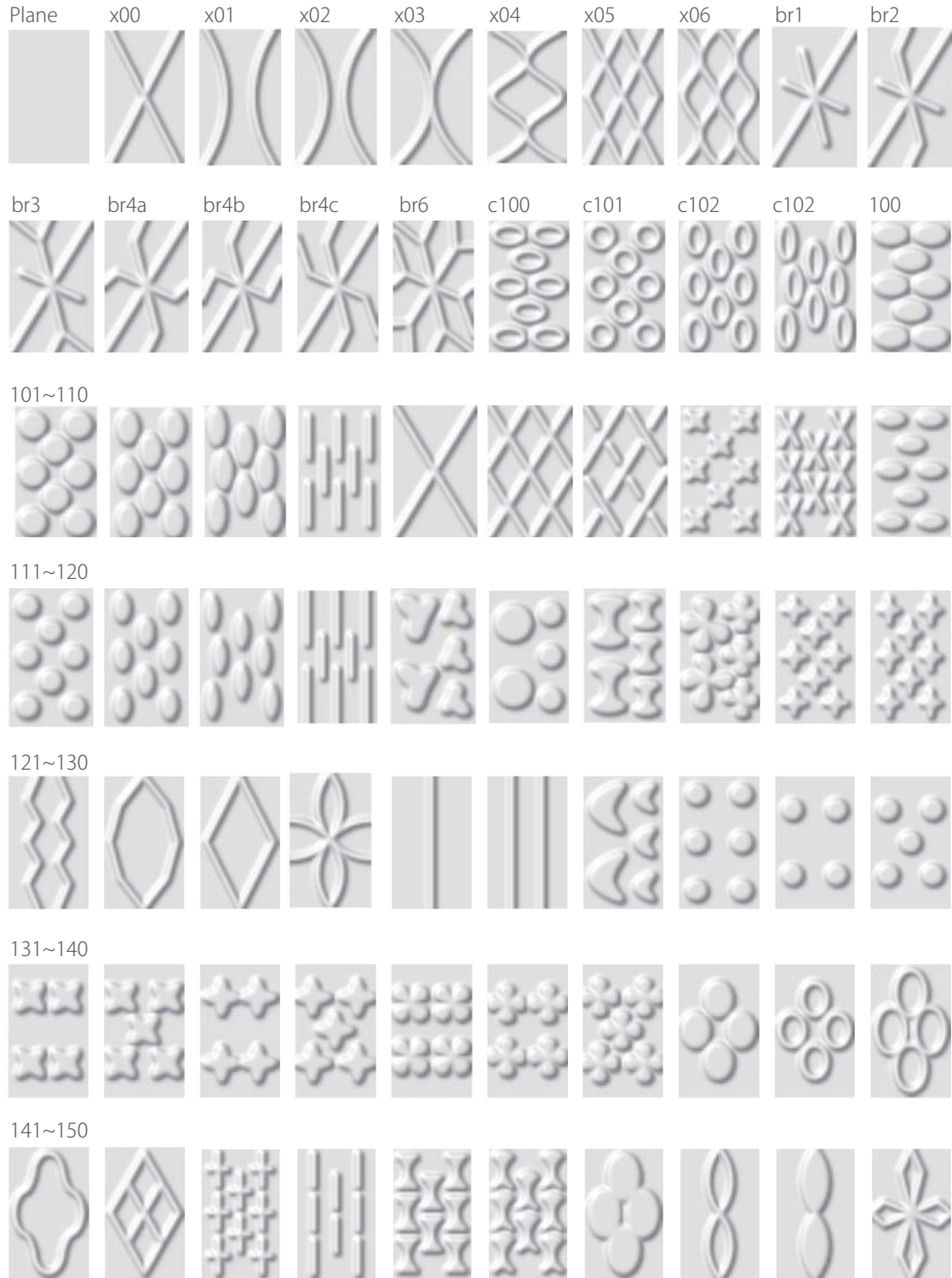
参考文献

1. 佐藤淳 .Lecture. (2017). <http://junsato.k.u-tokyo.ac.jp/essay12.htm>, (2018-01-18)
2. Nicholas, P., Zwierzycki, M., Stasiuk, D., Nørgaard, E., Leinweber, S., & Thomsen, M. (2016). Adaptive Meshing for Bi-directional Information Flows. *Sigrid Adriaenssens, Fabio Gramazio, Matthias Kohler*.
3. 奥戸行一郎, 坂本傑, 迫田章人, 高橋通泰, & 山口正雄. (2000). 2061 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.
4. Hassan, M. A., Saleh, M. A. E., Takakura, N., Ramesh, S., & Purbolaksono, J. (2012). Effect of bulge shape on wrinkling formation and strength of stainless steel thin sheet. *Materials & Design*, 42, 37-45.
5. 松居正夫, 蔦森秀夫, 加藤久佳, 鈴木義則, & 井上孝司. (2013). 六角ディンプルパターンシートのロール成形特性とプレス成形性. *塑性と加工*, 54(632), 846-850.
6. 新谷真人, 堀田祐介, & 永井拓生. (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: 構造の抽象化による新しい空間表現の実現 (構造). *日本建築学会技術報告集*, 10(19), 135-140
7. 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.
8. 酒巻正守, 三浦光亮, & 小野縁. (1980). <論文> ZETA 補強板の設計. *東京大学宇宙航空研究所報告*, 16(1), 639-647.
9. 高橋昌也. (2013). 板材の曲げ剛性を等方的に高める凹凸形状の開発. [http://www.altairatc.com/\(S\(bwuyw2rckjgskdp4jovh0a0p\)\)/EventPage.aspx?id=2929](http://www.altairatc.com/(S(bwuyw2rckjgskdp4jovh0a0p))/EventPage.aspx?id=2929), (2018-01-18)
10. 清本莉七, & 新谷真人. (2014). 20398 皺構造の生成と力学特性に関する研究 (曲面の形態創生, 構造 I, 2014 年度日本建築学会大会 (近畿) 学術講演会・建築デザイン発表会). *学術講演梗概集, 2014*, 795-796.
11. Narain, R., Pfaff, T., & O'Brien, J. F. (2013). Folding and crumpling adaptive sheets. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(4), 51.
12. 小林秀敏, 臺丸谷政志, & 栗林香織. (2000). フキの葉の脈系パターンとその力学的寄与. *材料*, 49(12), 1318-1323.
13. 平野薫, & バーデンアラン. (2007). 2022 葉の形態と脈系パターンを利用した屋根構造物への応用に関する基礎的研究 (構造). *日本建築学会関東支部研究報告集 I*, (77), 169-172.
14. 工藤俊輔, 宇野求, & 田中陽輔. (2012). 5324 トンボの翅脈の形態学的特性とその建築的応用可能性 (設計情報モデル, 建築計画, 2012 年度大会 (東海) 学術講演会・建築デザイン発表会). *学術講演梗概集, 2012*, 689-690.
15. 佐藤淳. (2010). *佐藤淳構造設計事務所のアイテム*. INAX 出版.

16. 日本建築学会 . (2005). 鋼構造設計規準 . 1970 年制定 .
17. Timoshenko, S. P., & Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of plates and shells*. McGraw-hill.
18. 古市渉平, 朝光拓也, 福山智子, & 佐藤淳 . (2011). 22444 銅製円形管で補剛された銅製有孔板の力学的性状 (その他の耐震要素, 構造 III). *学術講演梗概集 . C-1, 構造 III, 木質構造, 鉄骨構造, 鉄骨鉄筋コンクリート構造, 2011*, 887-888.
19. 3S Systems. iSense 3D Scanner | Technical Specifications | 3D Systems. <https://www.3dsystems.com/shop/isense/techspecs>, (2018-01-18)

付録

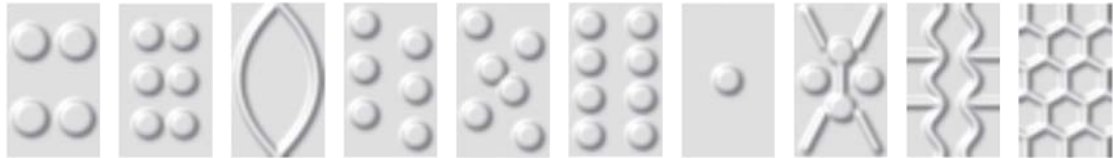
3章で解析した模様と耐力



151~160



161~170



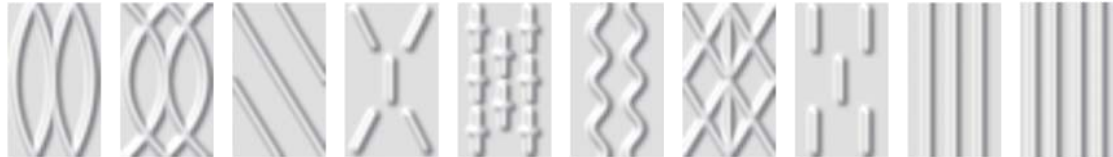
171~180



181~190



191~200



201~207



名前	降伏による 許容耐力 [tf]	座屈による 許容耐力 [tf]
Plane	294	8.5
x00	153	168.5
x01	258	239.9
x02	212	206.7
x03	144	124.2
x04	81	59.5
x05	162	202.2
x06	141	164.6
br1	96	83.3
br2	117	117.0
br3	105	149.0
br4a	66	101.1
br4b	87	113.3
br4c	99	149.0
br6	78	104.9
c100	40	25.0
c101	46	37.8
c102	70	59.5
c103	72	73.5
100	38	26.7
101	42	38.8
102	60	59.5
103	64	76.1
104	135	63.2
105	117	157.3
106	117	150.6
107	120	116.0
108	64	29.1
109	80	78.5
110	56	18.8
111	64	27.3
112	88	39.5
113	102	54.0
114	245	281.7
115	62	31.0
116	66	23.5
117	74	48.8
118	36	52.4
119	58	29.1
120	68	36.1
121	230	141.5
122	176	164.6
123	176	163.7
124	48	94.4
125	294	110.6

名前	降伏による 許容耐力 [tf]	座屈による 許容耐力 [tf]
126	294	226.5
127	76	31.9
128	84	15.9
129	80	12.7
130	74	19.4
131	68	15.6
132	56	44.2
133	42	18.0
134	32	26.9
135	42	26.2
136	34	25.1
137	32	29.7
138	44	44.2
139	50	42.3
140	60	78.6
141	82	58.7
142	68	62.4
143	84	74.9
144	172	89.6
145	68	85.0
146	70	108.1
147	44	80.3
148	225	126.4
149	168	172.6
150	50	99.7
151	80	160.9
152	4	8.2
153	40	89.6
154	54	125.3
155	123	133.6
156	42	95.3
157	62	136.1
158	78	18.1
159	86	19.7
160	98	23.6
161	74	14.7
162	92	20.8
163	168	167.5
164	92	20.6
165	72	21.7
166	105	33.3
167	88	11.1
168	82	68.4
169	96	120.0
170	56	66.8

名前	降伏による 許容耐力 [tf]	座屈による 許容耐力 [tf]
171	105	14.0
172	92	29.9
173	66	27.5
174	34	23.2
175	42	100.4
176	105	159.1
177	105	76.9
178	108	78.5
179	58	46.0
180	38	89.6
181	150	117.7
182	98	43.9
183	98	105.6
184	86	106.4
185	94	136.1
186	132	140.2
187	82	64.2
188	160	58.5
189	156	138.8
190	245	294.9
191	235	345.3
192	141	214.5
193	147	72.2
194	90	26.2
195	132	85.3
196	215	120.0
197	114	168.5
198	132	32.3
199	294	337.1
200	294	471.9
201	66	196.6
202	210	157.3
203	172	91.9
204	164	202.2
205	138	43.3
206	215	153.9
207	294	290.4

4 章で解析した模様と耐力

1~10



11~20



21~30



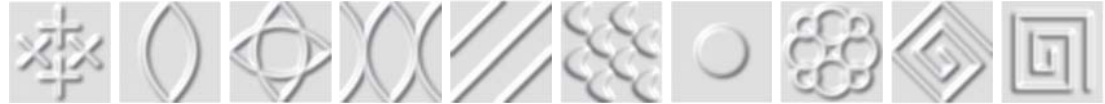
31~40



41~50



51~60



61~70

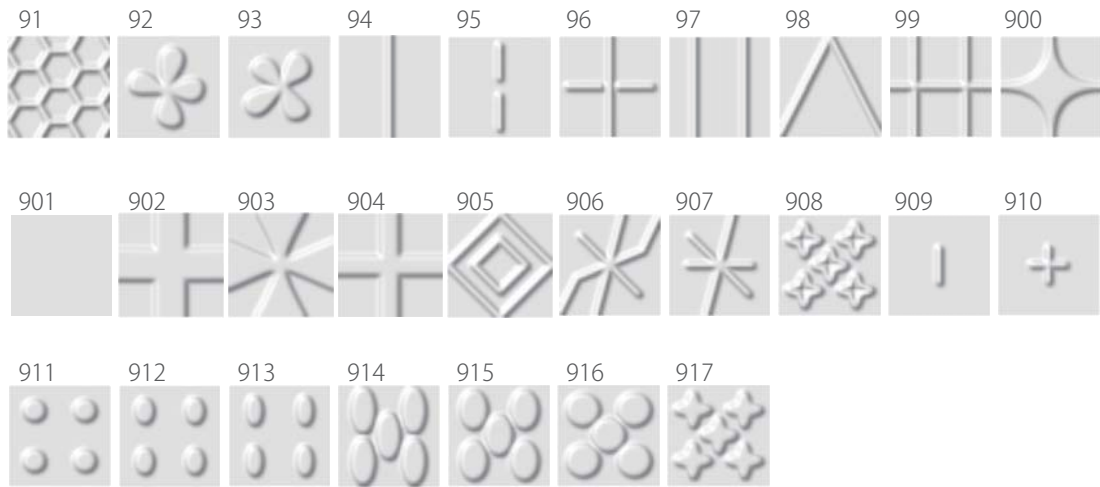


71~80



81~90





名前	Z方向降伏 による許容 耐力[tf]	X方向降伏 による許容 耐力[tf]	座屈による 許容耐力 [tf]
1	42	42	105.6
2	26	26	45.8
3	28	28	73.0
4	46	46	57.5
5	32	32	54.9
6	46	46	75.3
7	46	46	80.0
8	36	36	51.3
9	34	34	84.3
10	60	32	115.6
11	40	40	74.1
12	44	44	47.8
13	50	47	57.1
14	45	35	80.0
15	59	45	69.9
16	47	45	49.5
17	63	63	48.8
18	59	53	51.7
19	48	36	71.1
20	48	39	60.5
21	41	39	70.1
22	52	52	42.5
23	75	72	36.9
24	58	50	47.8
25	66	56	41.6
26	72	72	45.9
27	57	57	41.6
28	66	66	56.1
29	44	44	47.4
30	68	66	47.2

名前	Z方向降伏 による許容 耐力[tf]	X方向降伏 による許容 耐力[tf]	座屈による 許容耐力 [tf]
31	42	40	64.1
32	27	27	50.7
33	38	35	64.9
34	36	36	54.9
35	36	36	49.8
36	52	52	53.4
37	54	56	63.6
38	48	48	83.3
39	34	34	76.5
40	44	44	53.1
41	30	30	79.5
42	38	38	68.7
43	26	26	61.8
44	28	28	58.5
45	46	44	80.3
46	36	36	83.3
47	30	30	62.6
48	40	40	87.9
49	60	60	40.8
50	40	34	97.0
51	54	50	64.2
52	76	44	63.7
53	44	44	95.7
54	32	26	77.8
55	46	44	51.7
56	32	30	55.7
57	78	78	34.0
58	34	32	90.2
59	50	46	76.1
60	38	36	77.8

名前	Z方向降伏 による許容 耐力[tf]	X方向降伏 による許容 耐力[tf]	座屈による 許容耐力 [tf]
61	52	52	43.6
62	48	46	48.8
63	38	38	50.2
64	44	42	73.7
65	34	34	66.1
66	46	46	51.6
67	36	34	57.9
68	32	30	53.6
69	34	34	54.7
70	42	42	65.2
71	62	62	44.2
72	80	80	42.8
73	144	144	24.0
74	50	50	50.0
75	53	50	49.5
76	62	59	50.8
77	72	63	37.4
78	39	38	36.9
79	38	38	46.8
80	39	39	115.1
81	66	57	44.5
82	32	24	74.1
83	71	65	45.1
84	32	32	70.8
85	29	29	58.4
86	33	33	123.1
87	41	39	89.6
88	38	36	162.7
89	80	80	32.8
90	42	42	62.9

名前	Z方向降伏 による許容 耐力[tf]	X方向降伏 による許容 耐力[tf]	座屈による 許容耐力 [tf]
91	33	33	59.7
92	59	56	66.5
93	53	50	49.1
94	82	44	59.7
95	111	81	31.9
96	56	42	85.3
97	59	33	80.0
98	45	30	52.2
99	36	33	90.5
900	39	38	150.6
901	380	203	22.6
902	44	44	122.0
903	54	54	77.8
904	42	41	153.9
905	45	45	78.2
906	35	32	58.5
907	51	39	61.3
908	42	42	50.6
909	126	123	26.3
910	117	117	28.0
911	88	88	36.3
912	86	86	37.3
913	82	78	39.1
914	35	32	65.4
915	32	32	54.7
916	30	30	50.2
917	41	41	52.4