

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

2018 年度
修 士 論 文

地震時の吸収エネルギー分布を評価指標とする形状最適化手法の
3次元曲面構造物への応用

Application of Shape Optimization for Distribution
of Seismic Energy Absorption to 3-D Curved Structures

2019年1月21日提出
指導教員 社文 佐藤 淳 准教授

阪田 実
Sakata, Minoru

目次

第1章 序	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 研究概要	2
1.3 論文の構成	2
第2章 解析理論	3
2.1 解析プログラムの基礎	3
2.2 時刻歴解析の理論	6
2.3 エネルギー法の理論	9
2.4 吸収エネルギー分布図	12
2.5 形状操作と探索の手法	14
第3章 形状の基本操作と分類	16
3.1 アーチ形の解析	
3.1.1 解析概要	16
3.1.2 アーチ形と凹凸形の形状操作	18
3.1.3 アーチ形と谷形の形状操作	29
3.1.4 アーチ形の形状操作の複合	33
3.1.5 まとめ	36
3.2 ドーム形の解析	
3.2.1 解析概要	37
3.2.2 ドーム形と凹形の形状操作	39
3.2.3 ドーム形と凸形の形状操作	47
3.2.4 ドーム形と谷形の形状操作	50
3.2.5 まとめ	53
3.3 形態操作とエネルギー分布の関係	
3.3.1 凹凸形状	54
3.3.2 谷形状	56
3.3.3 形状の類似性とエネルギー分布	57
3.3.4 エネルギー分布の性質	58
3.4 まとめ	60

第4章 最適形状の探索とその手法	61
4.1 アーチ形の最適形状	
4.1.1 最適形状の探索	61
4.1.2 形状の異なるアーチ形の検討	72
4.2 ドーム形の最適形状	
4.2.1 最適形状の探索	76
4.2.2 支持部の異なるドーム形の検討	84
4.3 最適化手法の体系	86
4.4 まとめ	90
第5章 結	91
参考文献	93

第1章 序

1.1 研究の背景と目的

最適化手法は、限られた条件の中で効果を最大化するために各種の学問や社会の分野で活用されている。建築構造の分野においても古くから注目され、特に力学と形態が密接に関係するアーチやドームの構造においては、より軽くかつ信頼性の高い構造を実現するために重要となる。近年では設計・施工技術の発展により最適化手法で生成される複雑な形態を構造物として実現できるようになり、構造最適化の手法はますます注目されている。

実験的な手法としては、例えばアントニ・ガウディによる逆さ吊り理論や、これを面に応用し薄肉のシェルを実現したハインツ・イスラーの手法がある。近年では計算機の発達によって実験によらずとも、目的とする条件に対して最適な形態を求めることが可能となってきている。最適化問題とは、「満足すべき条件(制約条件)の下で、一つのシステムをある判断基準(目的関数)に従い最も望ましい状態にする問題」^[1]である。制約条件とは、変数の取り得る値の範囲であり、全体体積、最大応力、許容変形量などで与えられる設計変数の定義域である。目的関数とは、最大化したい性能を関数で表したものである。例えば代表的な手法の一つに、自重に対する垂直剛性を自重作用時の総歪みエネルギーで定式化し目的関数とするものがある^[2]。これにより一定の条件で自重に対して最も剛性の高い形態を求めることができる。

構造の性能として、垂直剛性の他には、水平剛性、最大変形、固有周期、崩壊形、偏心率などが考えられ、実際の設計は各種性能に対する多目的最適化であるが、性能の評価指標を限定する手法も多く提案されており、水平剛性や冗長性^[3,4]、固有周期^[5]など様々な指標が試みられている。

本研究は大地震時の構造物の損傷分布に着目する。構造物は、大規模地震に対しては損傷が許容されるが倒壊や崩壊を起こさないことが設計の目標とされる。望ましい崩壊形を実現するために目標とする損傷分布が設定でき、この損傷分布は吸収エネルギーの分布によって評価される。この吸収エネルギー分布を指標とすれば、大地震時にも安全な構造体が設計できる。我が国は地震大国であり、近年でも兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震のような巨大地震が起き、また、東南海地震や直下型地震なども予想される。こういった大地震、巨大地震に対し、構造物の損傷分布が適切であれば、被災後の建物機能の維持、損傷個所の早期修復が実現できる。さらに、万一の際にも、構造物が全壊することを防止し人的被害を抑えることができるであろう。

吸収エネルギー分布の制御は、多層のラーメン構造については秋山により、梁崩壊、柱崩壊という体系化がなされている^[6]。また曲面構造物についても吸収エネルギー分布のコントロールを行うという手法が提案されており、例えばアストラムライン新白島駅の設計には円形窓の配置を吸収エネルギー分布を指標として最適化するという手法が用いられている。本研究はこの手法を三次元的曲面の局所変形操作に応用する。先行研究として中村による論文^[7]を参照し、研究の初期段階として自由形状の中でも一般的なアーチ形状とドーム形状の構造物について検討を行う。本研究の目的は、第一に形態と吸収エネルギー分布の関係を明らかにすることである。第二にこの関係性をを用いて目標に設定したエネルギー分布を得る手法を示すことである。

1.2 研究概要

本研究は、構造の形状と吸収エネルギー分布の関係を整理し、吸収エネルギー分布を制御する形状操作の設計目標を示す。

吸収エネルギーの理論は秋山のエネルギーの釣合いに基づく耐震設計法^[6]による。構造物に大規模地震動が働くとき、弾性域を越えた部材に塑性ヒンジが形成され、エネルギーの吸収が起こる。大地震時に建物が吸収するエネルギーの総量は1次固有周期によって概ね決定され、質量や建物形状などに依らない。ここで、一定量のエネルギー吸収が起こる以上、このエネルギー吸収を構造物のどこで行うかが問題となる。塑性ヒンジは直ちに破断を起こすわけではないが、エネルギーを蓄積するにつれ疲労が起こり、最終的には破断に至る可能性がある。つまり、吸収エネルギー分布から起こり得る倒壊が予測できる。吸収エネルギー分布は時刻歴応答解析によって求められる。解析手法については第2章で後述する。

形状操作は、3次元曲面構造の代表としてアーチ形と4隅支持のドーム形について行う。これらに対し局所的な形状操作を加え、形状と吸収エネルギー分布の関係を整理する。その上で、形状操作の組合せによって目標とするエネルギー分布が得られるような形状の探索を行う。これにより手法の有効性を示すとともに探索法の考察を行う。

実際の設計においては、部材の安全率や自重に対する形状の効率性（機械的コンプライアンス）などを勘案しながら、それぞれを適度に満たす形状を多目的最適化となるが、本論では問題の簡単のため、吸収エネルギー分布のみを指標とし、その他の構造的性能は勘案しないものとする。

1.3 論文の構成

本論文は5章からなる。

1章は、研究の背景と目的を示す章である。1.1節では構造最適化の一手法としての本研究の背景と有用性を示した。1.2節では研究の概要を解説した。

2章では本研究で用いる理論を解説する。2.1節では研究に用いた解析プログラムの基礎、2.2節では時刻歴応答解析の理論を説明し、プログラム内で行われている処理の概要を述べる。2.3節ではエネルギーの釣合いに基づく耐震設計法の基本式を示し、大地震時に建物が吸収するエネルギーが地震からの総エネルギー入力に概ね一致することを示す。2.4節では吸収エネルギー分布を指標とする最適化手法の解析手順を記す。

3章では、基本的な形状操作と吸収エネルギー分布の関係を示す。3.1節ではアーチ形に対し基本的な形状操作を行い、分布がどのように変化するかを考察する。3.2節では四隅支持のドーム形に対し同様の検討を行う。3.3節では両者について共通する事項を総括する。

4章では3章を踏まえ、実戦的な形態の探索を行う。ここでは最終的な分布の目標を設定し、形状操作を繰り返すことで目標とする吸収エネルギー分布が得られることを示し、手法の有効性を確認するとともに、その体系化を行う。

5章に各章で得られた知見をまとめ、結論とする。

第2章 解析理論

本節では研究に用いる理論の解説を行う。本研究で用いる吸収エネルギー分布を求めるためには材料非線形時の時刻歴解析を行う。これには佐藤^[8]により開発された解析プログラムを用いる。2.1節と2.2節では、このプログラムの解説を行い、処理の過程を明示する。2.3節では研究の基礎理論であるエネルギーの釣合いに基づく耐震設計法について、参考文献を参照し概論を述べる。2.4節、2.5節では本章で解説した理論をもとに研究の概要と解析の手順を説明する。

2.1 解析プログラムの基礎

本節では研究に用いた解析プログラムの概要と設定を解説する。理論は『佐藤淳構造設計事務所のアイテム』(2010)^[8]による。

n 個の節点からなる立体骨組みについて、静的状態における有限要素法での全体剛性マトリクスを導く。まず、節点 i と節点 j をつなぐ部材を考える。部材断面を xy 平面とし、材軸を z 軸とする。

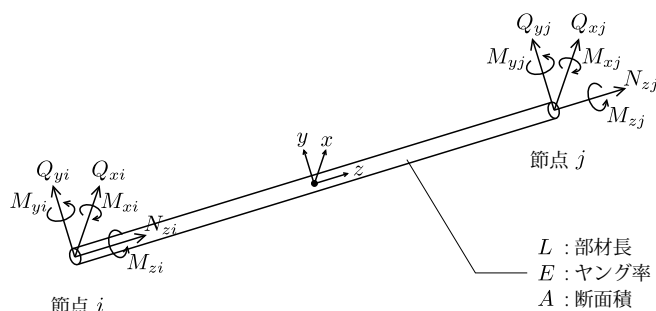


図 2.1 節点 i と節点 j を繋ぐ部材の端点に働く外力

節点の変位ベクトル \mathbf{u} と部材端に働く外力ベクトル \mathbf{f} を次のように定める。

$$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} N_{zi} \\ Q_{xi} \\ Q_{yi} \\ M_{zi} \\ M_{xi} \\ M_{yi} \\ N_{zj} \\ Q_{xj} \\ Q_{yj} \\ M_{zj} \\ M_{xj} \\ M_{yj} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{pmatrix} z_i \\ x_i \\ y_i \\ \theta_{zi} \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \\ z_j \\ x_j \\ y_j \\ \theta_{zj} \\ \theta_{xj} \\ \theta_{yj} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

仮想仕事の原理から節点の変位 \mathbf{u} と部材端の外力 \mathbf{f} の関係が立式でき、これを整理すると要素剛性マトリクス k_{ee} を用いて次のようなマトリクス形式に表される。

$$\mathbf{f} = k_{ee} \mathbf{u} \quad (2.2)$$

このとき、 $\begin{pmatrix} F_i \\ F_j \end{pmatrix} = T^T \mathbf{f}$, $\begin{pmatrix} U_i \\ U_j \end{pmatrix} = T^T \mathbf{u}$ であり、

$$\begin{pmatrix} F_i \\ F_j \end{pmatrix} = T^T \mathbf{f} = T^T k_{ee} \mathbf{u} = (T^T k_{ee} T)(T^T \mathbf{u}) = k_{ge} \begin{pmatrix} U_i \\ U_j \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

となる。この全体座標系での要素剛性マトリクス k_{ge} を以下のように 6×6 の4つの行列 k_{ii} , k_{ij} , k_{ji} , k_{jj} に分ける。

$$k_{ge} = \begin{pmatrix} k_{ii} & k_{ij} \\ k_{ji} & k_{jj} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

この4つの 6×6 行列 k_{ii} , k_{ij} , k_{ji} , k_{jj} を用い K_{ij} を次のように定める。また、2つの6次ベクトル F_i , F_j から F_{ij} を定める。ここで F_{ij} , K_{ij} はそれぞれ $n \times 1$ と $n \times n$ の配列であり、 i 番目と j 番目の成分にのみ値が入り、他は全て0である。

$$F_{ij} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ F_i \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ F_j \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, K_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & \dots & & & & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & & & \vdots \\ & & 0 & & & & \\ & & & k_{ii} & & & k_{ij} \\ & & & & 0 & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & 0 \\ & & & k_{ji} & & & k_{jj} \\ & & & & & & 0 \\ \vdots & & & & & & \ddots \\ 0 & \dots & & & & & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

構造物の各節点へ働く外力を $6n$ 次ベクトルで F 、この時の各節点の変位を $6n$ 次ベクトルで U と表すと、

$$K_{ij} U = K_{ij} (U_1 \ U_2 \ \dots \ U_n)^T = F_{ij} \quad (2.9)$$

であり、 F は各部材の両端に働く外力 F_{ij} の総和であるから、

$$F = \sum_{(i,j)} F_{ij} = \sum_{(i,j)} (K_{ij} U) = \left(\sum_{(i,j)} K_{ij} \right) U = KU \quad (2.10)$$

$$K \equiv \sum_{(i,j)} K_{ij} \quad \text{: 全体剛性マトリクス}$$

ここで (i, j) は部材で接続された節点の組合せ

となる。

つまり、要素剛性マトリクス k_{ee} を全体座標に変換した k_{ge} の各成分を、対応する行と列に配置し足し合わせることにより、全体剛性マトリクス K が求められる。

2.2 時刻歴解析の理論

本節では、引き続き『佐藤淳構造設計事務所のアイテム』(2010)^[8]を参照し、材料非線形時の剛性マトリクスと時刻歴解析の理論を解説する。

部材に塑性ヒンジが生じたときの要素剛性マトリクスを考える。塑性ヒンジについて、塑性流れ則は移動硬化とし、降伏曲面を次のように定義する。

$$F(f_1, f_2, \dots, f_6) = r^\beta \quad (2.11)$$

$$F \equiv \sum_{n=1}^6 \left| \frac{f_n - f_{nmid}}{f_{nmax} - f_{nmid}} \right|^\beta$$

ここで、 f_1, f_2, \dots, f_6 はそれぞれ $N_{zi}, Q_{xi}, Q_{yi}, M_{zi}, M_{xi}, M_{yi}$ に対応し、それぞれの n に対して f_{nmax} は f_n の最大値、 f_{nmid} は曲面の中心とする。 β は曲面の膨らみを表すパラメータであり、本解析では $\beta = 1.5$ とする。このとき曲面は膨らんだダイヤ形となる。 r は 1 とするとステップ解析の刻み幅によっては f_n が f_{nmax} を越える可能性が出るため、安全側の $r = 0.95$ とする。すなわち、 r が 0.95 を超えた時点で降伏曲面に達したとみなす。

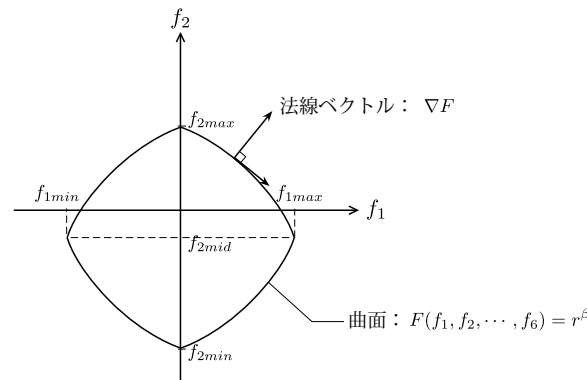


図 2.3 降伏曲面

塑性流れ則では塑性歪みの増分方向は偏差応力の方向、すなわち降伏曲面の法線方向に一致する。降伏曲面の法線ベクトルは、

$$\nabla F = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{f}} = \left(\frac{\partial F}{\partial f_1} \quad \frac{\partial F}{\partial f_2} \quad \dots \quad \frac{\partial F}{\partial f_6} \right)^\top \quad (2.12)$$

$$\text{ここで (2.11) 式より、} \frac{\partial F}{\partial f_n} = \beta \left| \frac{f_n - f_{nmid}}{f_{nmax} - f_{nmid}} \right|^{\beta-1}$$

である。

これを用いて塑性ヒンジが生じた後の要素剛性マトリクス k_{ep} が求められる。この k_{ep} は以下のようなになる。まず、2つの 12×2 マトリクス q 及び 2×2 マトリクス α を次のように定める。

$$q \equiv k_{ee} \begin{pmatrix} \nabla F_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \nabla F_j \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$$\alpha \equiv \begin{pmatrix} \nabla F_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \nabla F_j \end{pmatrix}^\top k_{ee} \begin{pmatrix} \nabla F_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \nabla F_j \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

ここで、この q を6次元ベクトルの 2×2 の配列とみなし各成分を $q_{ii}, q_{ij}, q_{ji}, q_{jj}$ と添字で表す。また、 α, k_{ee} についても同様に添字で表すこととする。すなわち、

$$\begin{pmatrix} q_{ii} & q_{ij} \\ q_{ji} & q_{jj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{eeii} \nabla F_i & k_{eeij} \nabla F_j \\ k_{eeji} \nabla F_i & k_{eejj} \nabla F_j \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{pmatrix} \alpha_{ii} & \alpha_{ij} \\ \alpha_{ji} & \alpha_{jj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \nabla F_i^\top k_{eeii} \nabla F_i & \nabla F_i^\top k_{eeij} \nabla F_j \\ \nabla F_j^\top k_{eeji} \nabla F_i & \nabla F_j^\top k_{eejj} \nabla F_j \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

この4つの6次元ベクトル $q_{ii}, q_{ij}, q_{ji}, q_{jj}$ と4つの値 $\alpha_{ii}, \alpha_{ij}, \alpha_{ji}, \alpha_{jj}$ を用いて次のように大きさ 12×12 の行列 k_p を定めると、塑性ヒンジ発生時の要素剛性マトリクス k_{ep} は k_{ee} と k_p の和で表される。

$$k_{ep} = k_{ee} + k_p \quad (2.17)$$

$$k_p = \begin{cases} -\frac{1}{\alpha_{ii}} \begin{pmatrix} q_{ii} \\ q_{ji} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{ii}^\top & q_{ji}^\top \end{pmatrix} & (\text{i 端のみ塑性ヒンジ}) \\ q \alpha^{-1} q^\top & (\text{i 端, j 端ともに塑性ヒンジ}) \\ -\frac{1}{\alpha_{jj}} \begin{pmatrix} q_{ij} \\ q_{jj} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_{ij}^\top & q_{jj}^\top \end{pmatrix} & (\text{j 端のみ塑性ヒンジ}) \end{cases}$$

1.2節と同様に要素剛性マトリクスの重ね合わせにより、塑性ヒンジが生じた状態の全体剛性マトリクス K が求められる。

続いて時刻歴振動解析の理論と設定を解説する。まず、構造物の節点 i の質量を m_i とし、質量マトリクス M_i, M を次のように定める。

$$M_i = \begin{pmatrix} m_i & & & & & \\ & m_i & & & & \\ & & m_i & & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & 0 & \\ 0 & & & & & 0 \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} M_1 & & & & & \\ & M_2 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & M_n \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

質量マトリクス M 、全体剛性マトリクス K 及び減衰マトリクス C を用いて多質点系の振動方程式は次のようになる。

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -M\ddot{U}_0 \quad (2.19)$$

M : 質量マトリクス U : 変位ベクトル
 K : 剛性マトリクス \ddot{U}_0 : 地動加速度ベクトル
 C : 減衰マトリクス

減衰は1次モード初期剛性比例型とする。このとき、減衰定数を h 、1次モードの固有角振動数を ω_1 とすると減衰マトリクス C は、

$$C = \frac{2h}{\omega_1} K \quad (2.20)$$

と表される。ここで減衰定数 h は鋼構造を想定し、 $h = 0.02$ とする。1次固有角振動数を ω_1 は固有値解析により求める。自由振動の式は、

$$M\ddot{U} + KU = \mathbf{0} \quad (2.21)$$

であり、固有値問題、

$$KU = \omega^2 MU \quad (2.22)$$

を解くことで、構造物の固有角振動数 ω 及び固有周期 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ が求められる。

運動方程式の解は、漸化式により再帰的に求める。Newmark の β 法に依れば解は以下ようになる。まず、時刻の刻みを Δt とし、ステップ数を s で表す。 s ステップでの変位、速度、加速度を $U_s, \dot{U}_s, \ddot{U}_s$ とする。ここで \bar{K} 、 $\overline{\Delta F}$ を次のように定める。

$$\bar{K} \equiv K + \frac{1}{2\beta\Delta t} C + \frac{1}{\beta\Delta t^2} M \quad (2.23)$$

$$\overline{\Delta F} \equiv -M\Delta\ddot{U}_0 + M\left(\frac{1}{\beta\Delta t}\dot{U}_s + \frac{1}{2\beta}\ddot{U}_s\right) + C\left(\frac{1}{2\beta}\dot{U}_s + \left(\frac{1}{4\beta} - 1\right)\ddot{U}_s\Delta t\right) \quad (2.24)$$

$$\beta = \begin{cases} \frac{1}{6} : \text{線形加速度法} \\ \frac{1}{4} : \text{平均加速度法} \end{cases}$$

このとき、変位の増分 ΔU と \bar{K} 、 $\overline{\Delta F}$ の間に、

$$\overline{\Delta F} = \bar{K}\Delta U \quad (2.25)$$

の関係が成り立ち、

$$\Delta U = \bar{K}^{-1}\overline{\Delta F} \quad (2.26)$$

により、時間が Δt 進んだ時の変位の増分 ΔU が求められる。

この ΔU と s ステップでの変位、速度、加速度を用いて、 $s+1$ ステップでの変位、速度、加速度が次の漸化式により求められる。

$$\begin{cases} U_{s+1} = U_s + \Delta U \\ \dot{U}_{s+1} = \frac{1}{2\beta\Delta t}\Delta U + \left(1 - \frac{1}{2\beta}\right)\dot{U}_s + \left(1 - \frac{1}{4\beta}\right)\ddot{U}_s\Delta t \\ \ddot{U}_{s+1} = \frac{1}{\beta^2\Delta t^2}\Delta U - \frac{1}{\beta\Delta t}\dot{U}_s + \left(1 + \frac{1}{2\beta}\right)\ddot{U}_s \end{cases} \quad (2.27)$$

2.3 エネルギー法の理論

本節では、秋山の『エネルギーの釣合いに基づく建築物の耐震設計』(1999)^[6]に基づき、エネルギー法の概要を解説する。

先に述べたように、構造物の振動方程式は次のように表される。

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -M\ddot{U}_0$$

上式の各項はそれぞれ、運動する質点の慣性力、粘性抵抗や散逸による減衰力、減衰構造体の剛性による復元力、そして右辺は地震力である。これに左から微小変位 dU をかけると、それぞれの力による仕事量となる。

$$dU^\top \underbrace{M\ddot{U}}_{\text{慣性力}} + dU^\top \underbrace{C\dot{U}}_{\text{減衰力}} + dU^\top \underbrace{KU}_{\text{復元力}} = -dU^\top \underbrace{M\ddot{U}_0}_{\text{地震力}} \quad (2.28)$$

これを時刻0から t まで積分すると、時刻 t における各エネルギーについての等式が得られる。

$$\int_0^t \underbrace{dU^\top M\ddot{U}}_{\text{運動エネルギー}} + \int_0^t \underbrace{dU^\top C\dot{U}}_{\text{減衰により散逸したエネルギー}} + \int_0^t \underbrace{dU^\top KU}_{\text{位置エネルギー}} = - \int_0^t \underbrace{dU^\top M\ddot{U}_0}_{\text{地震からの入力エネルギー}} \quad (2.29)$$

第1項は時刻 t における構造物のもつ運動エネルギー、第2項は時刻0から t までの間に散逸した減衰によるエネルギーの吸収量、第3項は時刻 t 構造物の剛性によるポテンシャルエネルギー、右辺は時刻0から t までの地震からの入力エネルギーの総和を表す。

ここで第3項のポテンシャルエネルギーを弾性分と塑性分に分ける。全体剛性マトリクス K は k_{ep} の重ね合わせであり、

$$k_{ep} = k_{ee} + k_p \quad (2.30)$$

であるから、

$$\int_0^t dU^\top KU = W_{es} + W_p \quad (2.31)$$

W_{es} : 弾性歪みエネルギー

W_p : 累積塑性歪みエネルギー

運動エネルギーを W_{ek} 、減衰によるエネルギー吸収量を W_h 、地震からの総エネルギー入力を E とおく。

$$W_{ek} = \int_0^t dU^\top M\ddot{U} \quad (2.32)$$

$$W_h = \int_0^t dU^\top C\dot{U} \quad (2.33)$$

$$E = - \int_0^t dU^\top M\ddot{U}_0 \quad (2.34)$$

また、運動エネルギーと弾性歪みエネルギーの和を弾性振動エネルギーと呼び、 W_e で表す。

$$W_e = W_{ek} + W_{es} \quad (2.35)$$

このとき、(2.29) 式のエネルギーの釣り合い式は以下のように表現される。

$$W_e + W_h + W_p = E \quad (2.36)$$

W_e : 弾性振動エネルギー
 W_h : 減衰によるエネルギー吸収量
 W_p : 累積塑性歪みエネルギー
 E : 総エネルギー入力

これがエネルギーの釣り合いに基づく耐震設計法の基本式である。

ここで、振動終了時には弾性振動エネルギー W_e は 0 であり、また、減衰については $h \leq 0.05$ では減衰項によるエネルギー吸収はそれ程大きなものではなく、減衰によるエネルギー吸収 W_h は十分に小さい。そのため、累積塑性歪みエネルギー W_p は総エネルギー入力 E に概ね一致する。

$$W_p \cong E \quad (\because \text{振動終了時において、} W_e = 0, W_h \ll W_p) \quad (2.37)$$

多質点系の総エネルギー入力 E はモーダルアナリシスにより定式化されている。 J 次モードのモード関数を ϕ_J とする。

$$U = \sum_J \phi_J u_J \quad (2.38)$$

ϕ_J : モード関数
 $u_J := A_J \sin(\omega_J t + \alpha_J)$

このとき、 $\sum D_J \phi_J = 1$ をみたす D_J を導入すると、多質点系の総エネルギー入力 E は次のように表される。

$$E = \sum_J E_J \quad (2.39)$$

$$E_J = \frac{1}{2} M (V_1(\omega_J) D_J)^2 \quad (2.40)$$

ここで、 ω_J は J 次モードの固有角振動数、 $V_1(\omega_J)$ は対応する 1 質点系の総エネルギー入力 E_{1J} の速度換算値である。さらに安全側に近似することで、

$$E = \frac{1}{2} M \sum_J (V_1(\omega_J) D_J)^2 \cong \frac{1}{2} M (V_1(\omega_1))^2 \quad (2.41)$$

となり、総エネルギー入力 E は 1 次モードの角振動数をもつ 1 質点系の総エネルギー入力を速度換算した値 $V_1(\omega_1)$ により概算できる。

総エネルギー入力 E に対し、この速度換算値 V_E は次のように定義する。

$$V_E \equiv \sqrt{\frac{2E}{M}} \quad (2.42)$$

V_E : 総エネルギー入力の速度換算値

この速度換算値 V_E は構造物の質量に依らない値であり、複数のモデルに対し同一のエネルギー応答スペクトルを用いることができる点で有用である。本研究ではエネルギー応答スペクトルは、縦軸に総エネルギー入力の速度換算値 V_E 、横軸に固有周期 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ をとったものを用いる。エネルギー応答スペクトルは固有周期を変えて1質点系の振動解析を繰り返しプロットすることにより得られる。

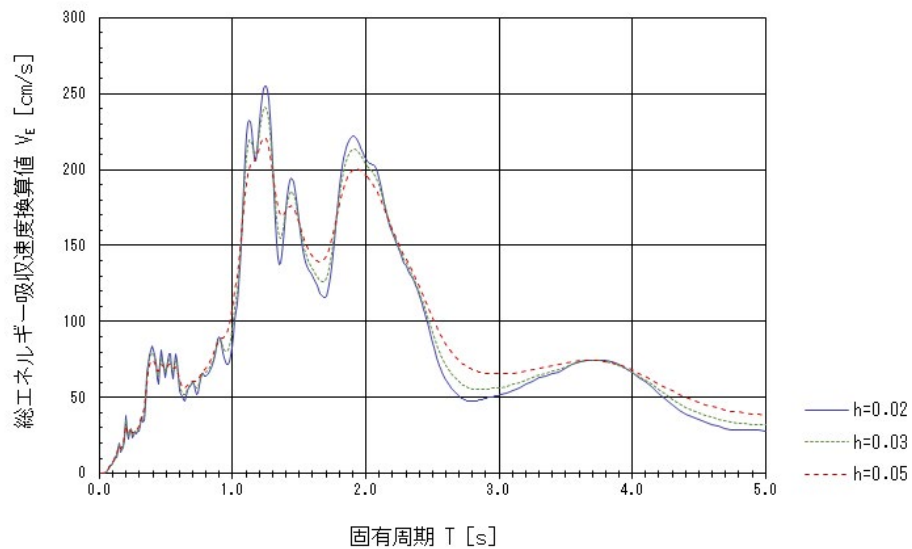


図 2.4 エネルギー応答スペクトル
(兵庫県南部地震 JR 鷹取駅南北成分)

2.4 吸収エネルギー分布図

前節で述べたように、吸収エネルギーの総量は総エネルギー入力に相当し、これは構造物の1次固有周期に依存した安定した量である。エネルギーは塑性ヒンジによって累積塑性歪みエネルギーの形で吸収される。塑性ヒンジは直ちに破断を起こすわけではないが、疲労は蓄積され、部材が最終的に破壊状態に至るまで塑性歪みは単調増加で累積し続ける。各節点における累積塑性歪みエネルギーの大きさは部材の破断のリスクであり、部材の損傷度を表す。そのため、固有周期一定の条件で構造物の形状を検討する場合、このエネルギーをどの部材で吸収するかという点が重要となる。この部材ごとのエネルギー吸収量を表示した図が吸収エネルギー分布図である。

吸収エネルギー分布図は、図2.5のように各節点における吸収エネルギーの量を球の大きさと表示する。この円表示を吸収エネルギー団子と呼ぶ。エネルギー団子は節点のエネルギー吸収が起こっている部材側に表示され、図のように1つの節点に4本の部材が取りついている場合、4個のエネルギー団子が表示される。

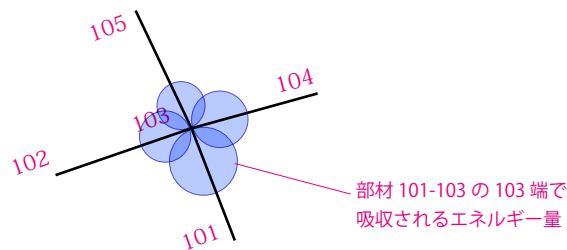


図2.5 吸収エネルギー団子の模式図

吸収エネルギーの量は損傷度を表すということから、吸収エネルギー分布の制御は損傷分布の制御であるといえる。損傷の分布は、図2.6の(a), (b), (c)のような分布が典型的であり、(a)は梁崩壊(b), (c)は柱崩壊、と呼ばれる。

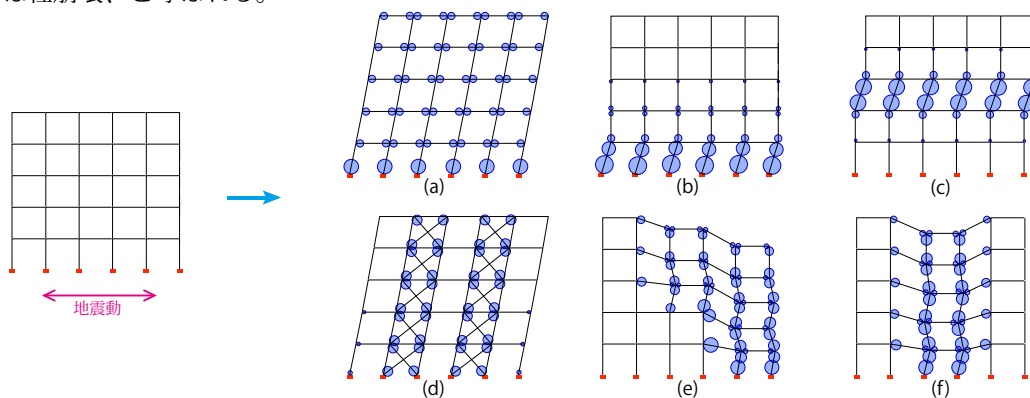


図2.6 吸収エネルギー分布と崩壊形の模式図

エネルギー法の考え方によると、一般の構造では(a)のような梁崩壊形と呼ばれる分布が良いとされる。(b)のような分布は層崩壊を起こし、いわゆるパンケーキクラッシュと呼ばれる危険な壊れ方を起こす。また、層崩壊は(c)のように中間層で起こる場合もある。一方で(b)や(c)の分布は免震層の考え方において重要であり目標とされる分布である。これは入力されるエネルギーを敢て免

震層に集中的に吸収させ、重要な構造に損傷を起こさせないという考え方である。制振構造では (d) のようにブレース材などの制振要素にエネルギーを吸収させる。(e) や (f) のような部分崩壊も起こり得る。いずれの崩壊形を目指すかは構造物に求められる性能に応じ設計者が選択する。なるべく多くの部材にエネルギー吸収を分散し、損傷を抑えるならば (a) であり、重要建築物の保存や超高層などでは (b) 基礎免震や (c) 中間層免震などを採用するであろう。また、大地震時に損傷が許容される部分と損傷を抑えたい主屋が複合しているような場合には (e) のような分布を目指すことも考えられる。

アーチ形やドーム形についても、同様のことが考えられる。図 2.7 において (a) のような分布は多くの部材にエネルギーの吸収を負担させる分布であり、損傷に至るまでにより多くのエネルギーを吸収できる分布形ということができる。一方、(d) のような分布は損傷の発生箇所が 3 ヶ所に限定されており、たとえ損傷が発生しても機構的に不安定になりにくい分布形といえる。(a)(b)(c) のように 4 ヶ所やそれ以上でエネルギー分布が発生する場合は機構的に不安定となるリスクがある。

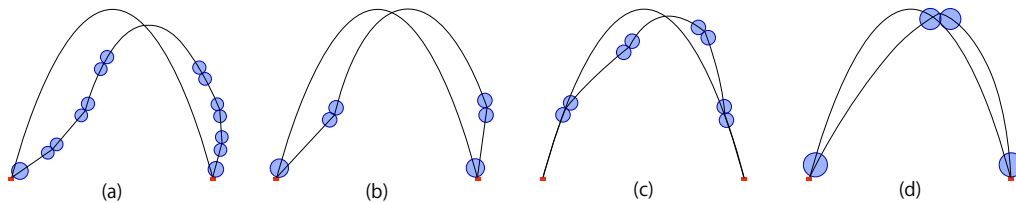


図 2.7 アーチ形の吸収エネルギー分布と崩壊形

地震動は必ずしも左右対称には働かないため、エネルギー分布は対称な形にならないこともあるが、この左右非対称は振動の入力の正負で変わるものでありその両方向に対し同じ効果が得られるよう、形状操作は振動方向に対し対称な操作とする。

先行研究^[6]において中村は、5つの地震波形——1940年 Imperial Valley 地震 El Centro 観測波 N-S 成分, 1952年 Ken County 地震 Taft 観測波 E-W 成分, 1968年十勝沖地震八戸港観測波 E-W 成分, 1978年宮城県沖地震東北大学建築学科棟 1F 観測波 E-W 成分, 1995年兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波 N-S 成分——について吸収エネルギー分布を調査し、地震波形によらず吸収エネルギー分布が同じ傾向を示すことを発見している。この中でエネルギー分布の総量を安定させるためにバイリニア型のエネルギー応答スペクトルを持つ地震波を用いることも提案されているが、本研究は吸収エネルギー分布の定性的な評価を行うことが目的であるため、特に波形に手を加えず原波を用いる。本研究では設計用地震波として、1995年兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波 N-S 成分を用いる。地震波の入力は本研究では 1 方向のみとし、2 方向の揺れは考慮しない。将来的には 2 次元地震波に対し最適化をすることが望まれる。

2.5 形状操作と探索の手法

最適形態の生成は実験的手法による。最適化問題は数理的な解析手法がよく認知されているが、さまざまな法則が関係する複雑な問題や未知の法則に従う問題に対する初期段階の手法としては、試行による実験的手法が有効である。本論でも剛性分布や振動モード、変形機構などの法則が関係した複雑な問題と推測され、検討の初期段階として実験的な手法を採用することとする。

実験の手順としては、まず初期形状に対しいくつかの形状操作を試行し吸収エネルギー分布の傾向を確認する。そのうえで、安全な崩壊形を与える吸収エネルギー分布に近づくように形状操作を繰り返し組み合わせ、目的のエネルギー分布を与える形状を探索する。解析の手法は、図2.8のフローチャートに示すように、形態操作と振動解析を繰り返す手順となる。

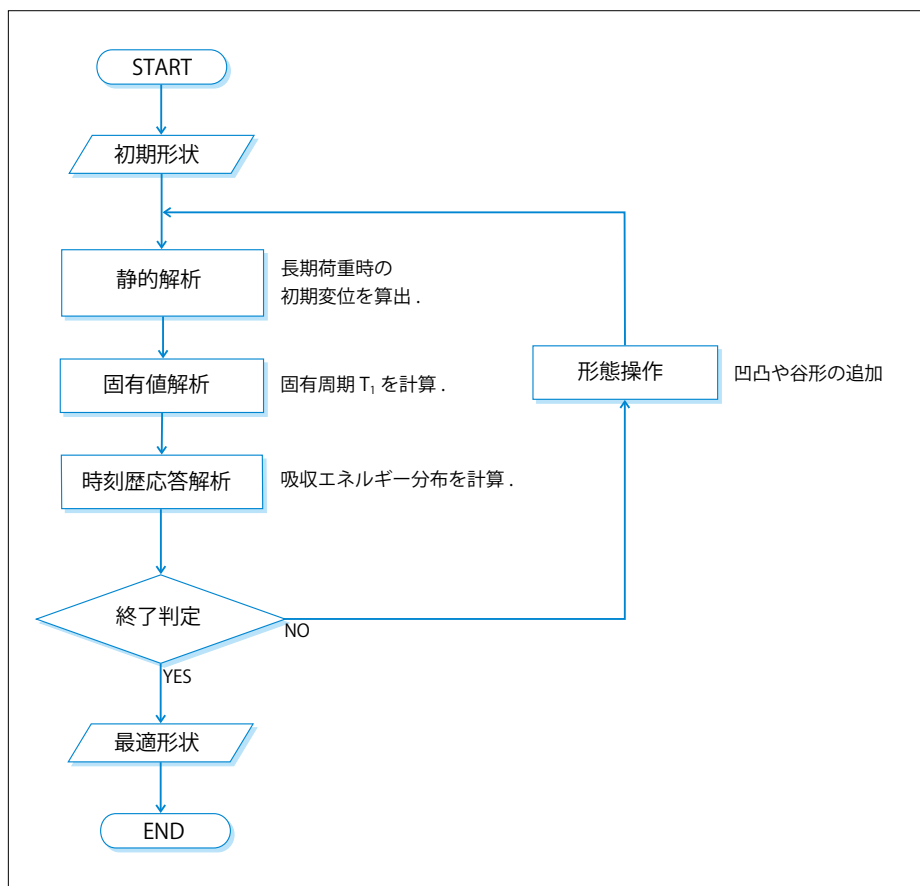


図 2.8 解析手順のフローチャート

形状操作は図 2.9 のような凹凸形状と谷形状の 2 種類について検討を行う。形状操作はモデルの振動方向左右に対称な位置に行い、この左右対称な操作を 1 回行うことを基本操作と呼ぶこととする。

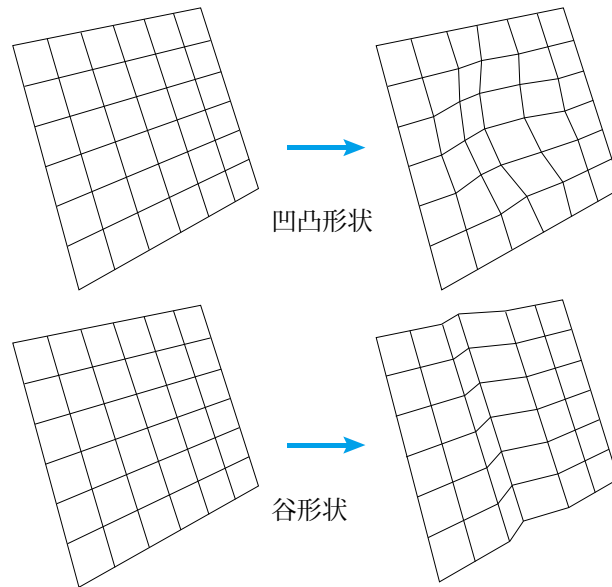


図 2.9 形状の局所操作

形状操作によりモデルの 1 次固有周期が変わるのでこれを式 (2.43) により統一する。これは形状の違いによるモデルごとの剛性の差を調整することであり、ヤング率を小さくすることは設計上はより断面の小さな材を採用することに相当する。断面設定の変更を行うと断面性能の値が変わってくるため、便宜上、ヤング率によって剛性の調整を行う。固有値解析によりモデルの 1 次固有値 T を求め、次式により調整後のヤング率 E' を求める。

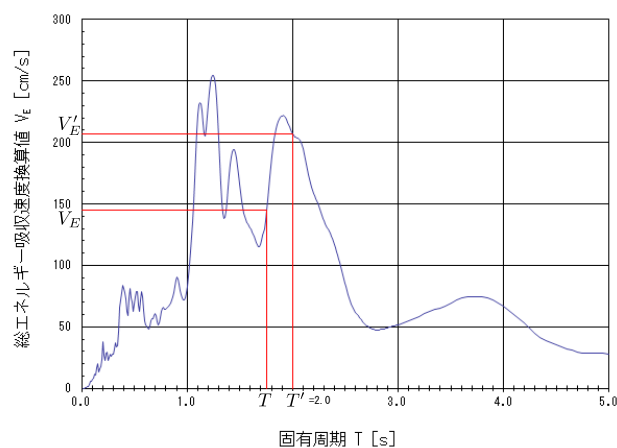
$$E' = \left(\frac{T}{T'}\right)^2 E \quad (2.43)$$

E : 調整前のヤング率

E' : 調整後のヤング率

T : 調整前の 1 次固有周期

T' : 調整後の 1 次固有周期



これにより総エネルギー入力がモデルによらず一定となり、吸収エネルギーの総量一定の条件下でその分布のみを比較することができる。

第3章 形状の基本操作と分類

本章では基本的な形状操作と吸収エネルギー分布の関係性を、アーチ形と四隅支持の方形のドーム形について調査し考察を行う。ここでは、凹凸や谷状の窪みという簡単な形状操作と、これらを組み合わせた操作を行う。これにより次章に述べる、より複雑な手動形態解析を行うための指針と着眼点を明らかにする。

3.1 アーチ形の基本操作とエネルギー分布

3.1.1 解析概要

本節で用いるモデルの初期形状と設計諸元を図 3.1、表 3.1 に示す。本モデルは線材で構成された骨組モデルとする。モデルはスパン 20 m、高さ 20 m、奥行 16 m であり、約 2 m 間隔のグリッドである。初期形状でアーチの曲線はカテナリー曲線である（これは重力に対して最適化された形状である）。支点はアーチの下端の全節点を固定支持とし、その他の節点は全方向に自由とする。部材断面は円形鋼管 ϕ -300 \times 12 mm とし、構造の自重に加えて仕上げ材の重量が曲面の 1 平方メートルあたり 0.4 t 加わるものとする。地震波の入力は X 軸方向つまりスパンの方向に行う。地震波は 150 kine に基準化を行う。

表 3.1 設計諸元

部材断面	ϕ -300 \times 12 (mm)
材料	SN400
支持条件	固定支持
仕上げ材質量	0.4 (t/m ²)
1 次固有周期	2.0 (s)
基準化	150 (kine)

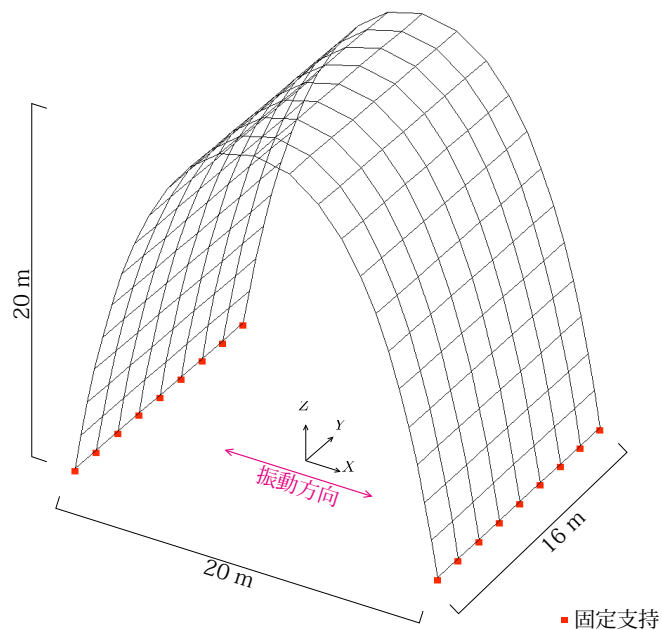


図 3.1 初期形状

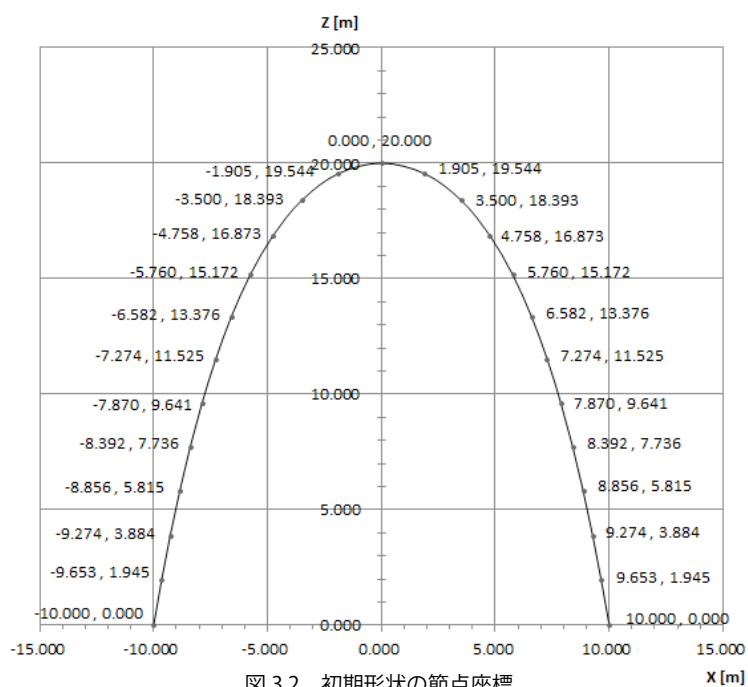


図 3.2 初期形状の節点座標

初期形状での吸収エネルギー分布は図 3.3 のようになる。エネルギー分布は、正面から見て、両肩部と足元の計 4 ヶ所にまとまった分布となる。肩部のエネルギー吸収は下から数えて 8, 9, 10 番目の節点に分布する。また、足元の吸収部は下から 1, 2 番目の節点に分布する。奥行き方向に対しては均一な分布となる。

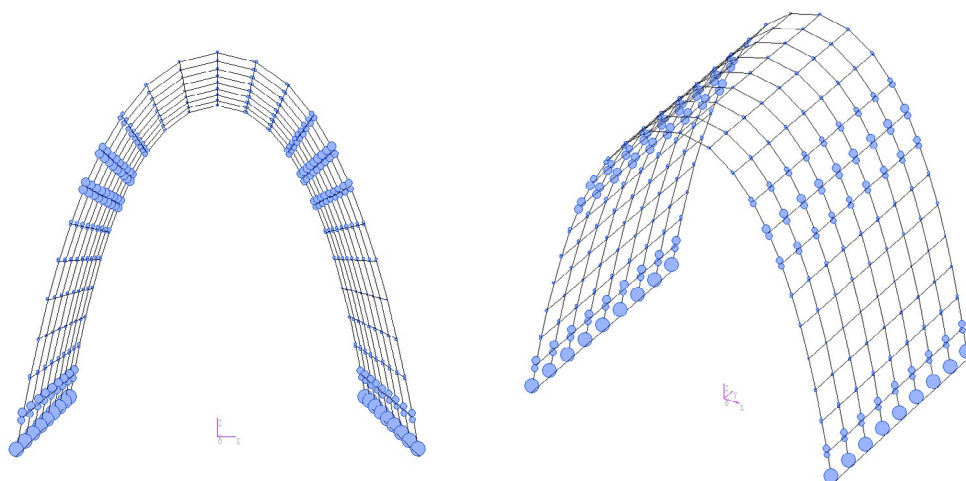


図 3.3 初期形状の吸収エネルギー分布 (左: 正面図, 右: アクソメ)

3.1.2 アーチ形と凹凸形の形状操作

ここでは、このアーチ形に凹凸状の形状を設けた時の吸収エネルギー分布をみる。

先行研究^[7]によれば側面に凹みを設けることでエネルギー吸収分布が移動することが示されている。ここでは凹みの位置を様々に変え、それに対する吸収エネルギーの分布を検討する。凹みは赤丸で印した点を中心に周囲の点が正弦曲線に沿って追従するような変形とする。凹みの範囲は図に赤印で示す制御点から3節点離れた点までの範囲とし、凹みの深さは1 mとする。

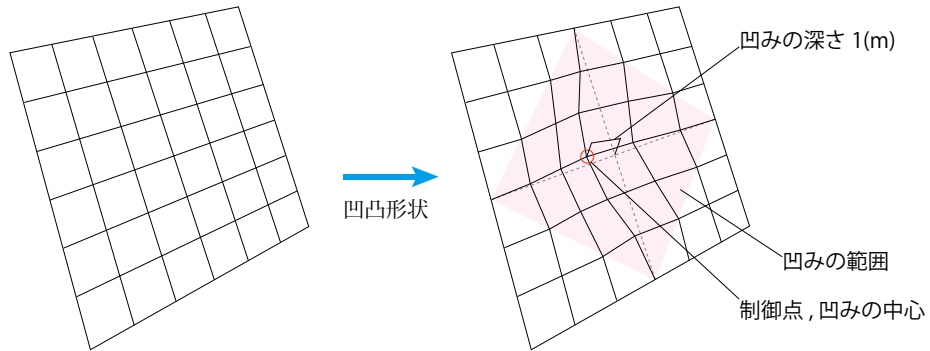


図 3.4 凹み形状の寸法

次の図 3.5, 図 3.6, 図 3.7 はそれぞれ下から 8 番目、10 番目、5 番目の節点を中心に凹みを作成したモデルの吸収エネルギー分布図である。図 3.7 は頂点を中心に凹ませたモデルである。

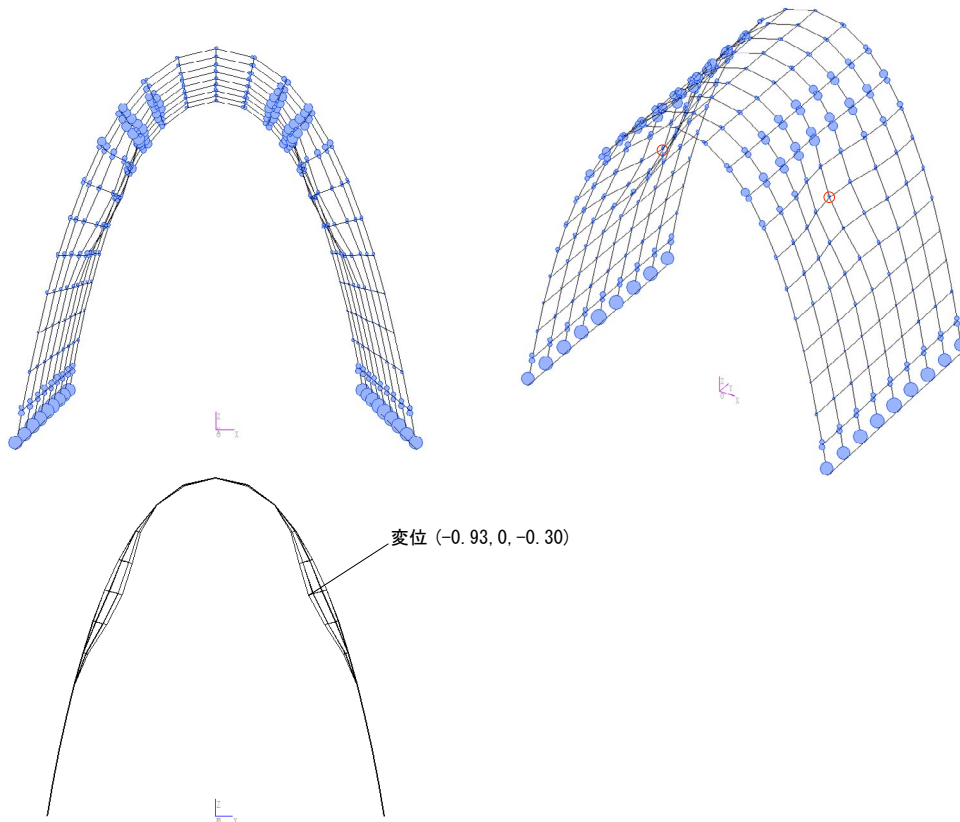


図 3.5 下から 8 の点を中心に凹み [A1] (左：正面図, 右：アクソメ, 下：変形図)

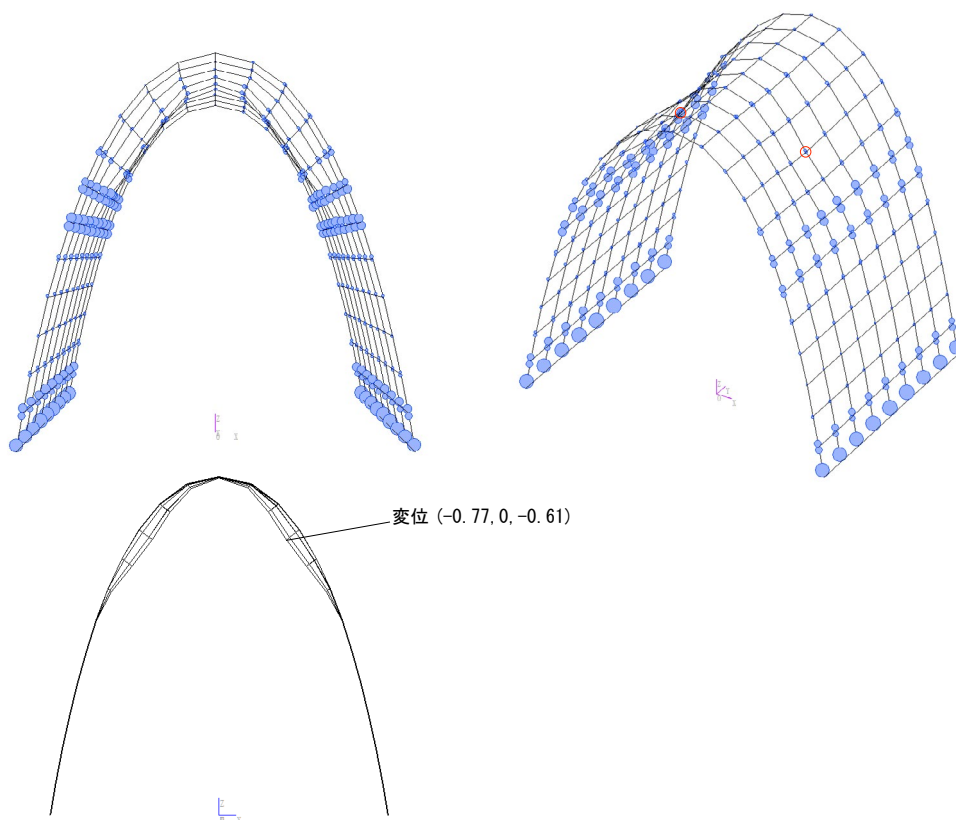


図 3.6 下から 10 番目の節点を中心に凹み [A2] (左:正面図, 右:アクソメ, 下:変形図)

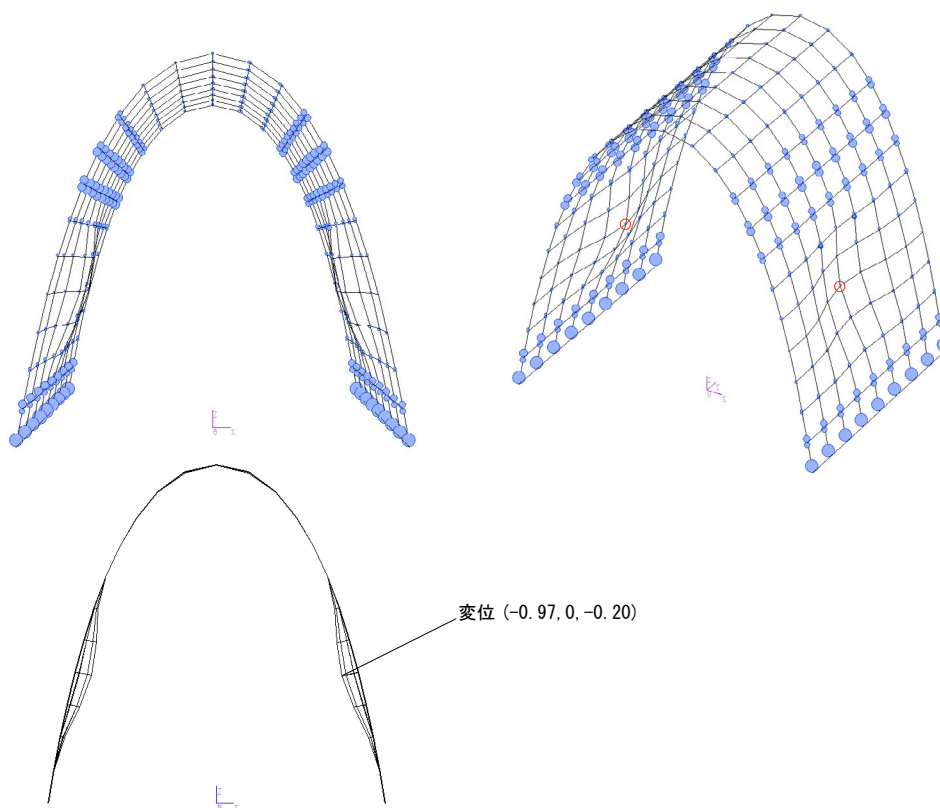


図 3.7 下から 5 番目の節点を中心に凹み [A3] (左:正面図, 右:アクソメ, 下:変形図)

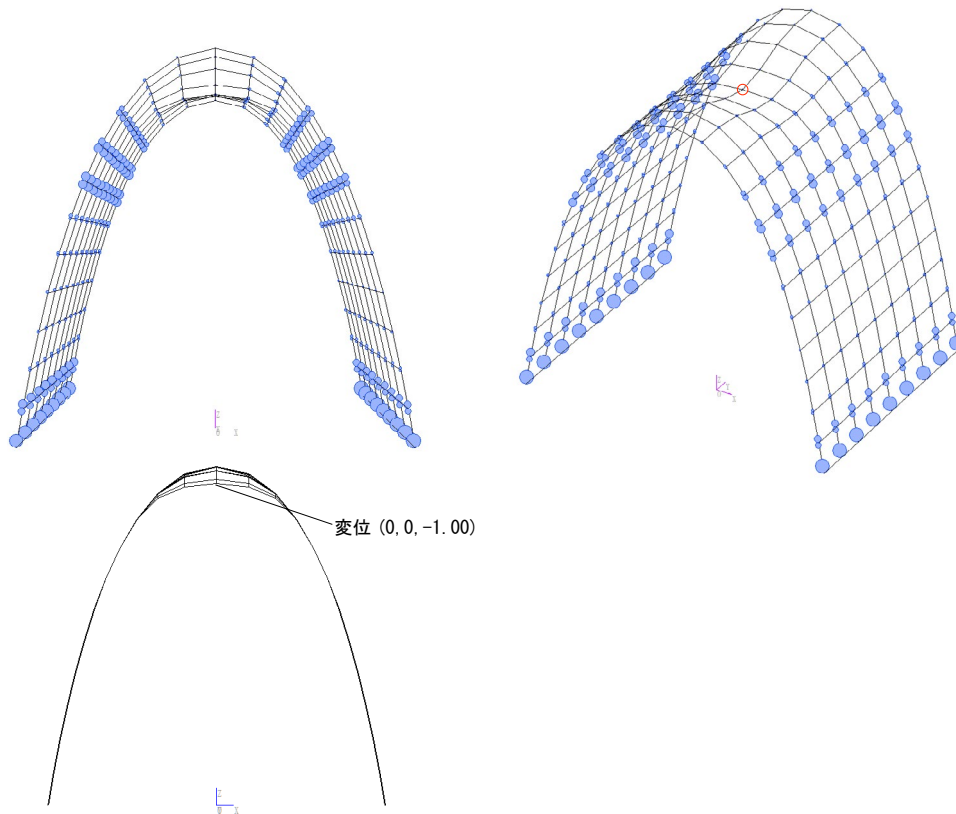


図 3.8 頂部の節点を中心に凹み [A4] (左: 正面図, 右: アクソメ, 下: 変形図)

図 3.5 は、初期形状の肩部エネルギー吸収部の下寄りの位置に凹みを持つ。この凹みによりエネルギー吸収部は上寄りの位置に移る。図 3.6 は、初期状態のエネルギー吸収部の上寄りに凹みを持ち、エネルギー吸収部は凹みの下へ移る。図 3.7, 図 3.8 は、もともとエネルギー吸収部のない領域に凹みを作った例である。もともとエネルギー分布のない位置の凹みでは、吸収エネルギー分布の変化は見られない。

この凹みによるエネルギー分布の違いは、凹み形状の周囲で局所的に剛性が高まり応力がそちらへ移動したためと考えられる。波状の板が曲げに強いように凹み部では曲げに強い領域ができており、その分の変形が周囲の弱い部分に移るとも考えられる。もともとエネルギー分布の発生しない領域では、そもそも振動時の応力がそれ程高くないため分布変化の効果がないと考えられる。

図3.9示すように、凹みの位置に応じてエネルギー分布の変化の様子が異なる。また、下段に示すように、もともとエネルギー分布のない位置の凹みでは、吸収エネルギー分布の変化は見られない。

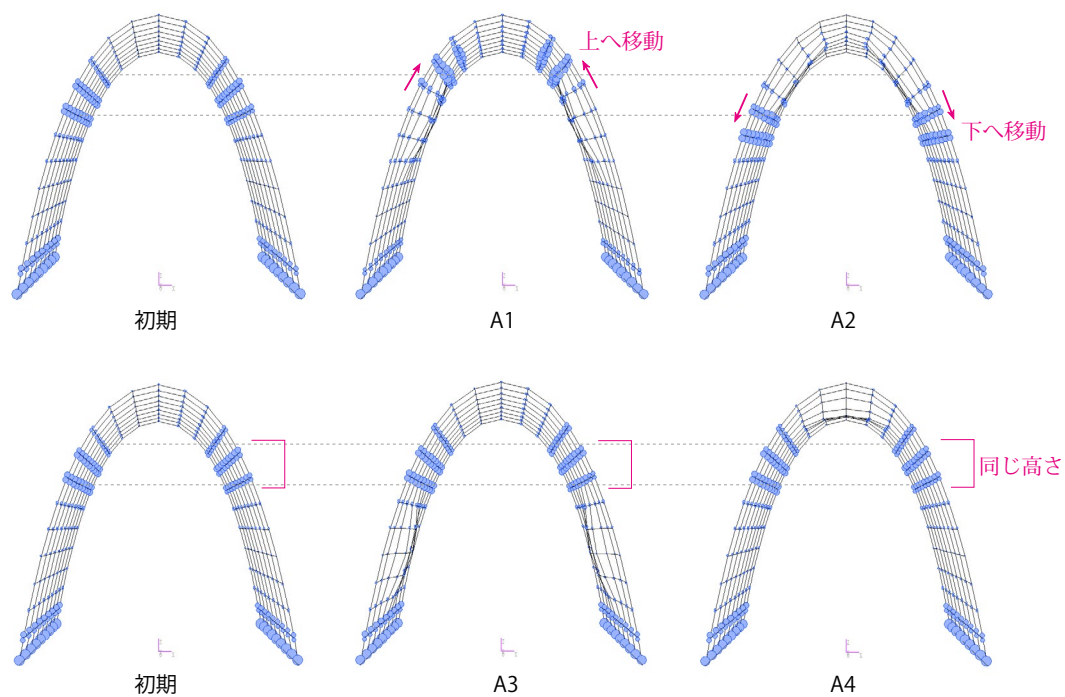


図3.9 肩部の凹凸操作の凹みの位置の違いによる比較

第3章 形状の基本操作と分類

同様にアーチの外方向へ膨らませる操作について検討を行う。膨らみの範囲と高さは凹みと同様に膨らみ中心から3節点分の範囲、高さ1 mとする。図3.10, 図3.11, 図3.12, 図3.13はそれぞれ下から8番目、10番目、5番目の節点と、頂点を中心に膨らみの操作を行ったモデルである。

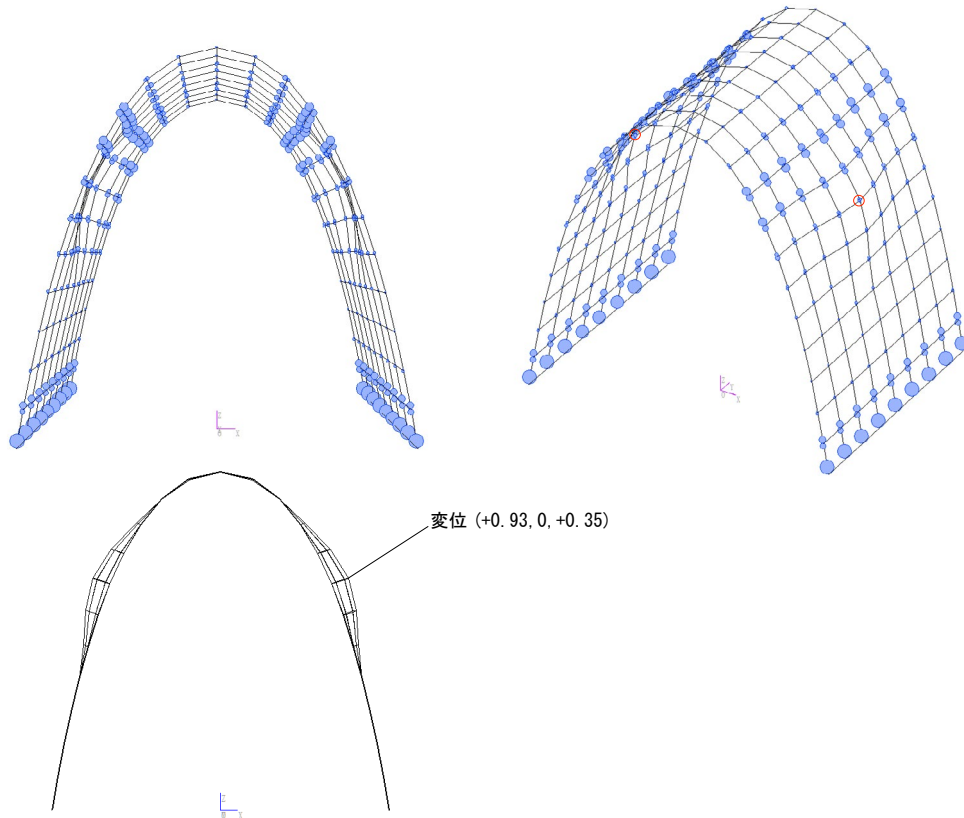


図3.10 中央列下から8の点を中心に膨らみ [B1] (左:正面図, 右:アクソメ, 下:変形図)

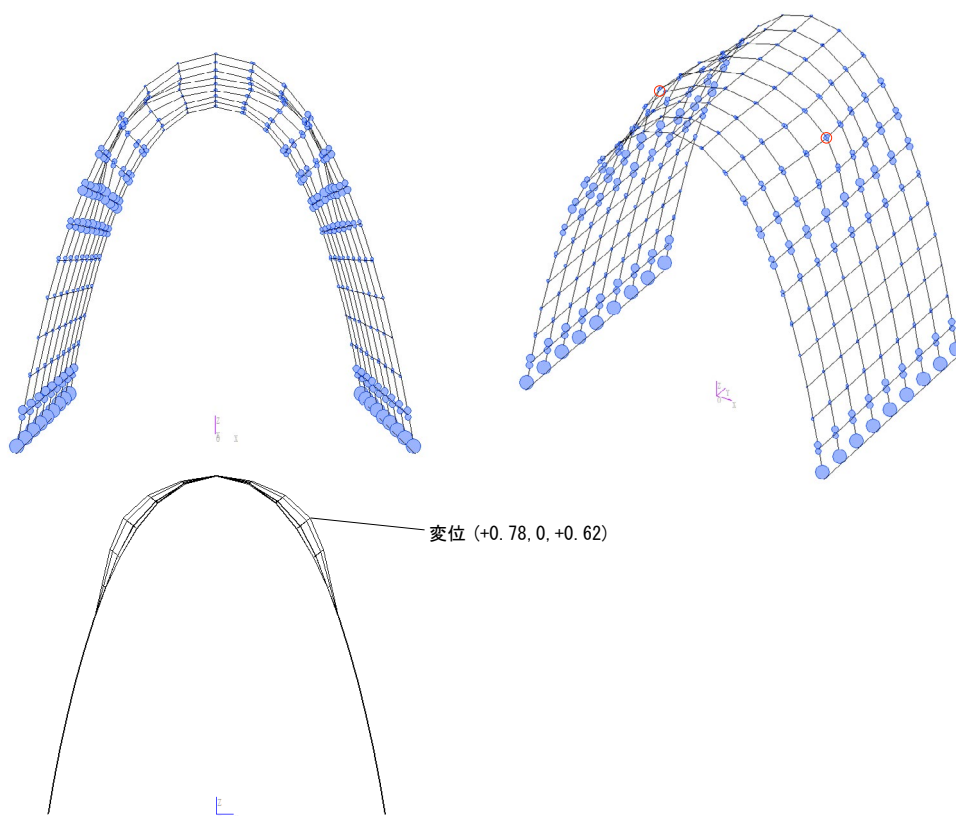


図3.11 中央列下から10の点を中心に膨らみ[B2](左:正面図,右:アクソメ,下:変形図)

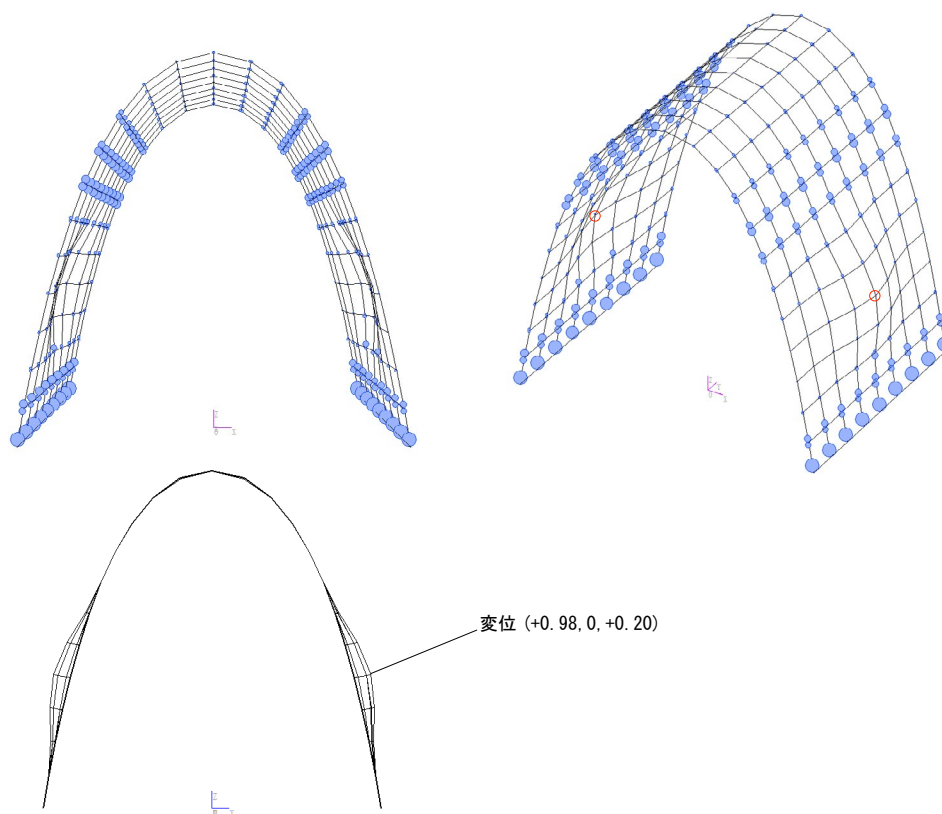


図3.12 中央列下から5の点を中心に膨らみ[B3](左:正面図,右:アクソメ,下:変形図)

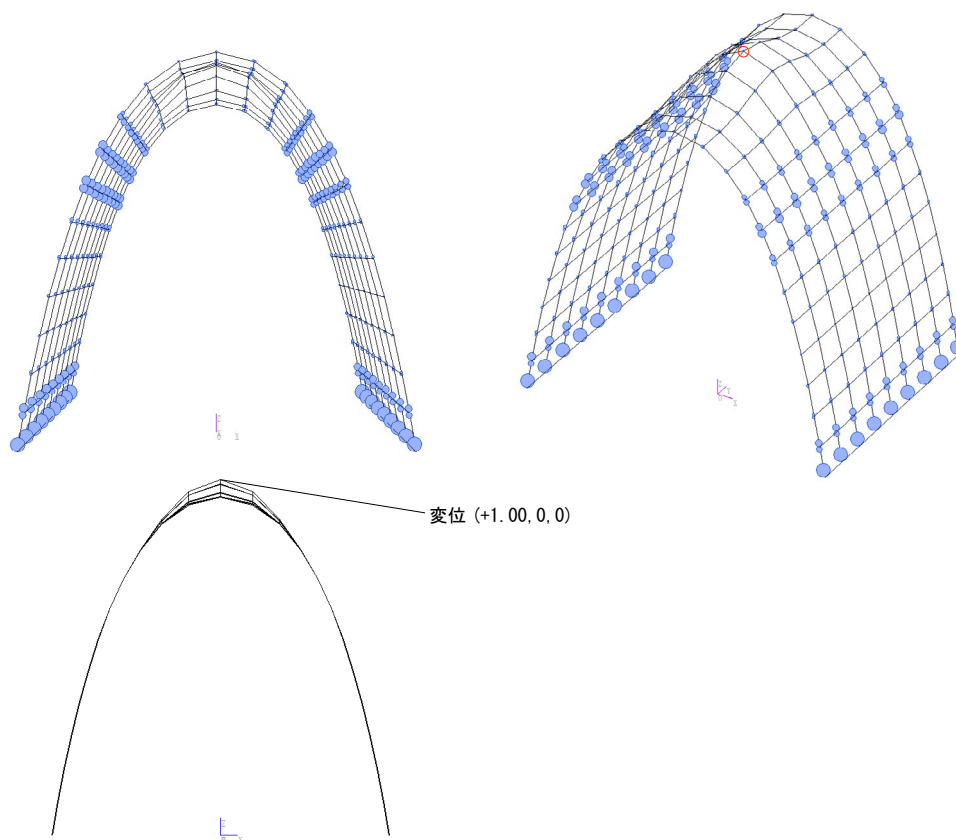


図 3.13 中央列頂部の点を中心に膨らみ [B4] (左:正面図,右:アクソメ,下:変形図)

図 3.10 は初期形状での肩部エネルギー分布の位置の下寄りを膨らませたモデルであり、凹ませた場合 (図 3.5) と同様にエネルギー吸収部が上へ移動する。図 3.11 も図 3.6 と同様に下へ移動することが分かる。吸収エネルギー分布が元々ない部分へ操作を加えた図 3.12, 図 3.13 では分布に変化は見られない。

図 3.14 のように膨らませる操作と凹ませる操作を比べると、凹ませる方が分布の移動効果が大きい。B1 では A1 に比べ図中 P の位置のエネルギー吸収量が少ない。B2 では A2 に比べて図中 Q の位置に比較的多くのエネルギー吸収が残っている。

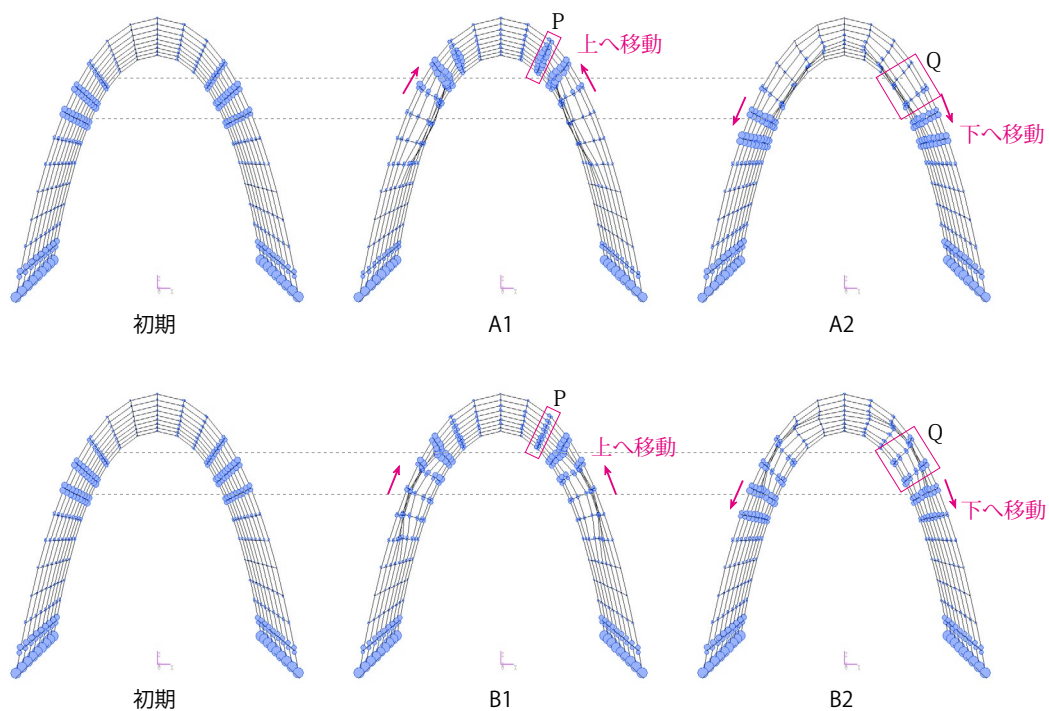


図 3.14 肩部の凹凸操作の比較

第3章 形状の基本操作と分類

次に足元部に凹凸を作成することを考える。図 3.15 は足元の点を内側へ凹ませたモデルである。また、図 3.16 は足元の点を外側へ膨らませたモデルである。ここでは凹凸の高さは 1.5 m とする。

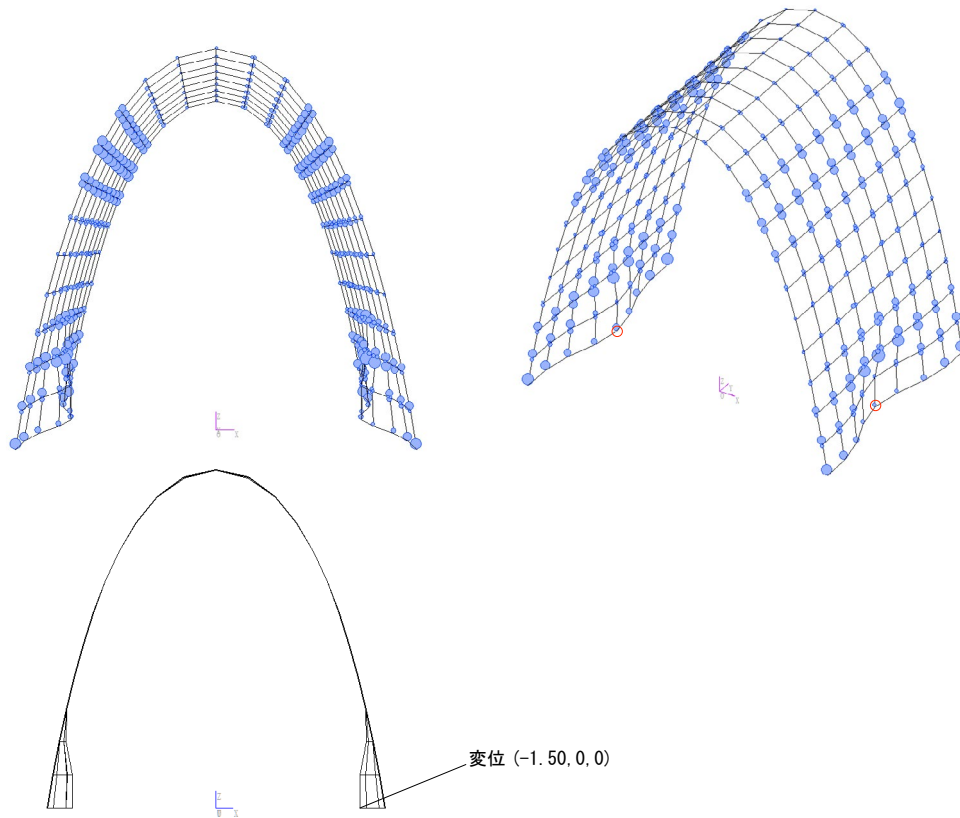


図 3.15 足元中央に凹み [A5] (左: 正面図, 右: アクソメ, 下: 変形図)

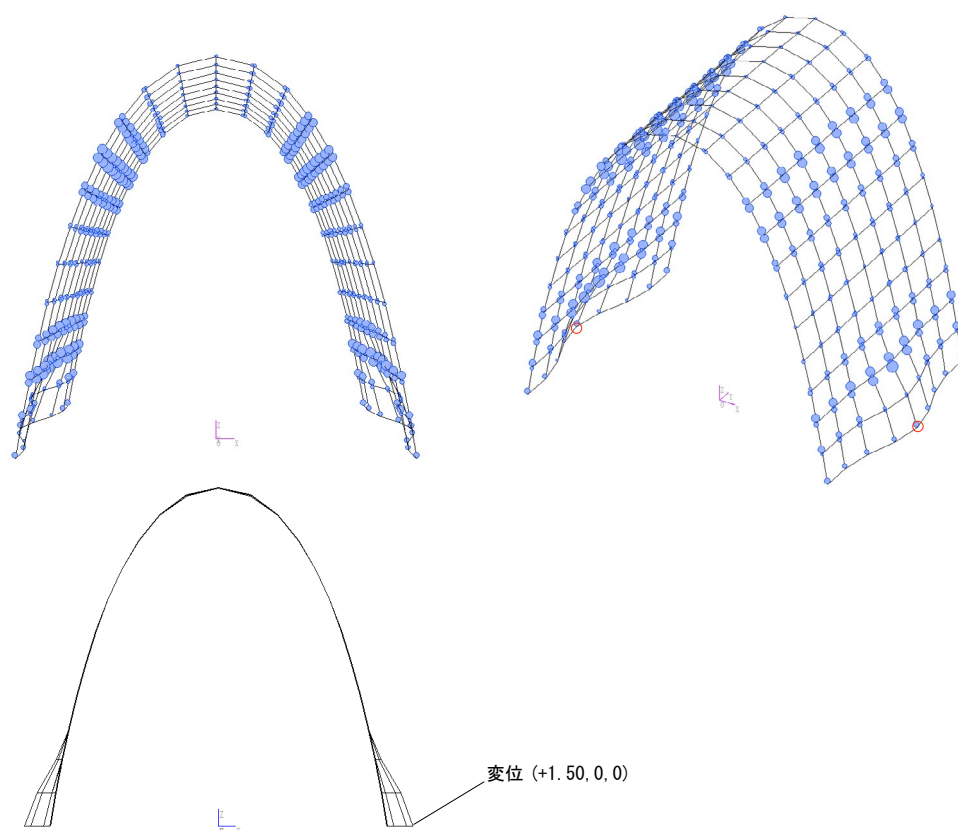


図 3.16 足元中央に膨らみ [B5] (左: 正面図, 右: アクソメ, 下: 変形図)

吸収エネルギー分布は図 3.17 のように、ともに初期状態よりも上方向への分布の移動が確認できる。分布を比較すると足元を凹ませる操作は凹み周辺部にエネルギー分布が残り、エネルギー分布を移動させる効果が膨らませる場合に比べて小さい。肩部、脚部ともに凹凸の方向で効果にやや違いがあることが分かる。肩部の操作は凹ませる方が良く、足元の操作は膨らませる方が良いといえる。

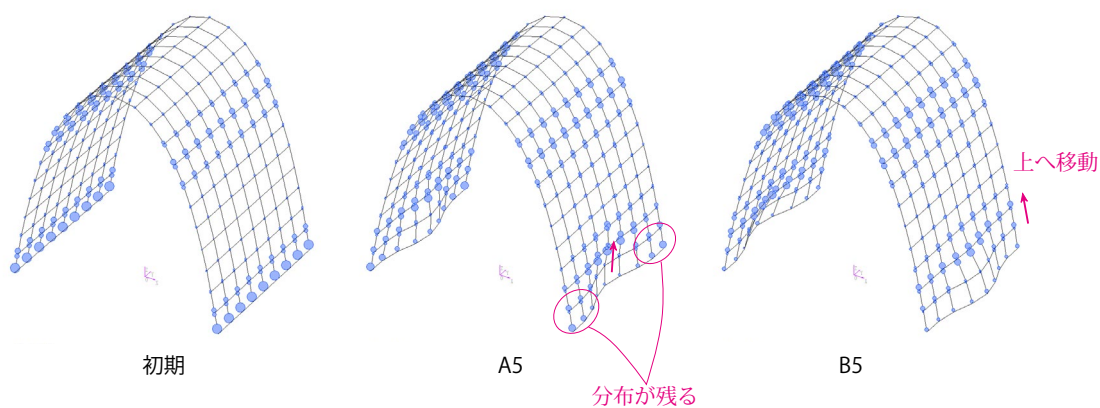


図 3.17 足元への凹凸操作の比較

図3.18は、足元に凹みを二つ並べたモデルである。ここでは凹みの範囲はモデルの奥行きの関係からY方向は2節点分とする。足元の吸収エネルギー分布が全体的に上方向に移ることがわかる。凹みを2つ並べることで効果の範囲が合わさり、全体的に分布の発生が上に移動したと考えられる。このように、幅広い範囲のエネルギー分布を変化させるには複数の凹みを並べることが有効であるといえる。

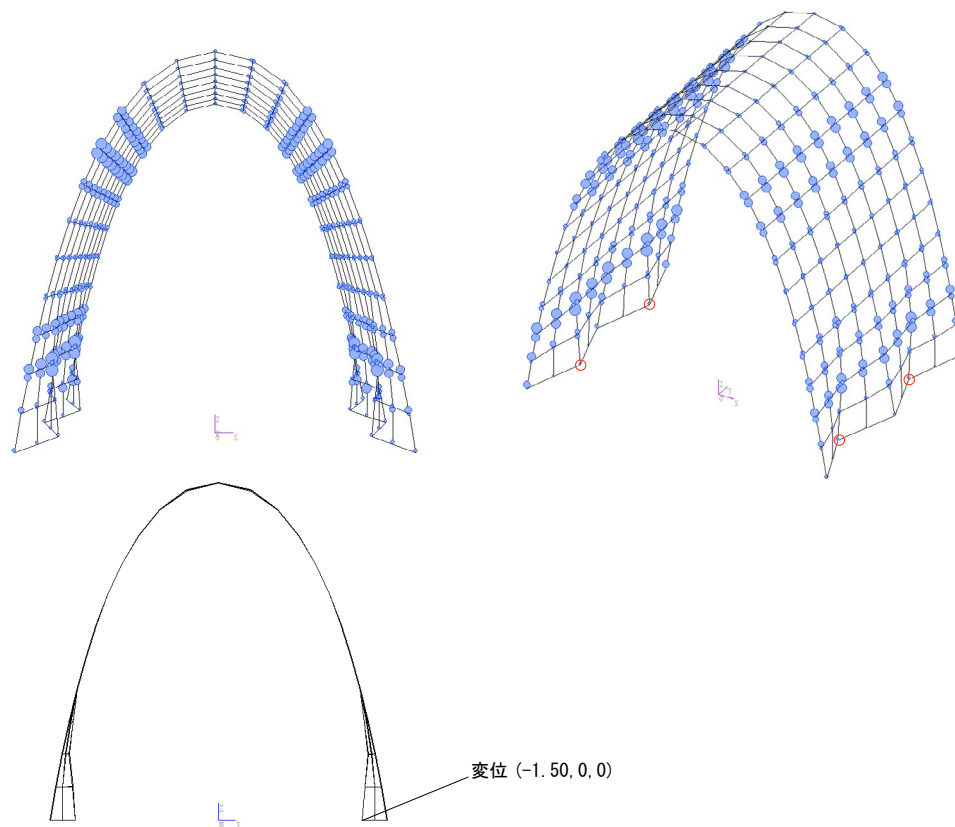


図3.18 足元に凹みを2つ並べる [A6] (左:正面図,右:アクソメ,下:変形図)

以上から、アーチ形に凹凸を与える操作を行った際の吸収エネルギー分布について次のことが言える。

1. アーチ形のエネルギー分布発生個所に凹凸を作成すると、分布は凹凸を避けるように移動する。
- 2 分布移動の効果の範囲が狭い場合、凹凸を複数横に並べることにより幅広い範囲の分布を移動させることができる。

3.1.3 アーチ形と谷形の形状操作

続いて、谷状の窪みをもつアーチ形の吸収エネルギー分布を調べる。谷形状の深さは約 1 m、幅は谷の中心から両側 2 節点の範囲とする。

図 3.20 は、赤線で示した材に沿って窪ませ、谷形状を設けたモデルである。谷形状の形状操作を施すと、吸収エネルギー分布は上下に幅広く分散する。分布を観察すると、初期形状では肩部に存在したエネルギー分布が減少し、谷状の窪みに沿って帯状に分布する。

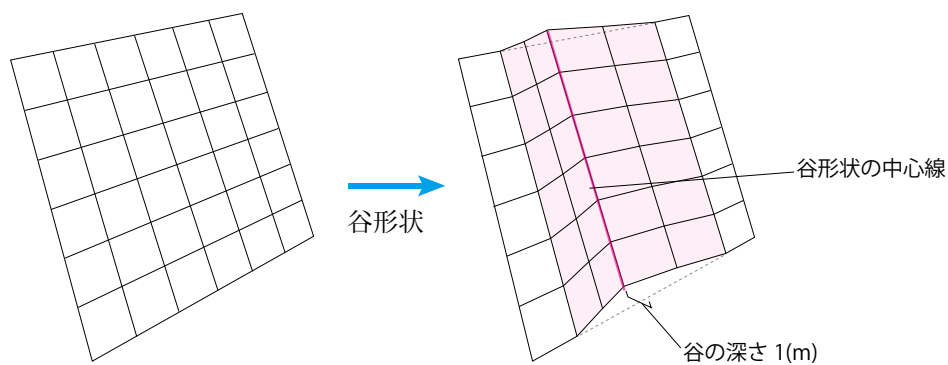


図 3.19 谷形状の寸法

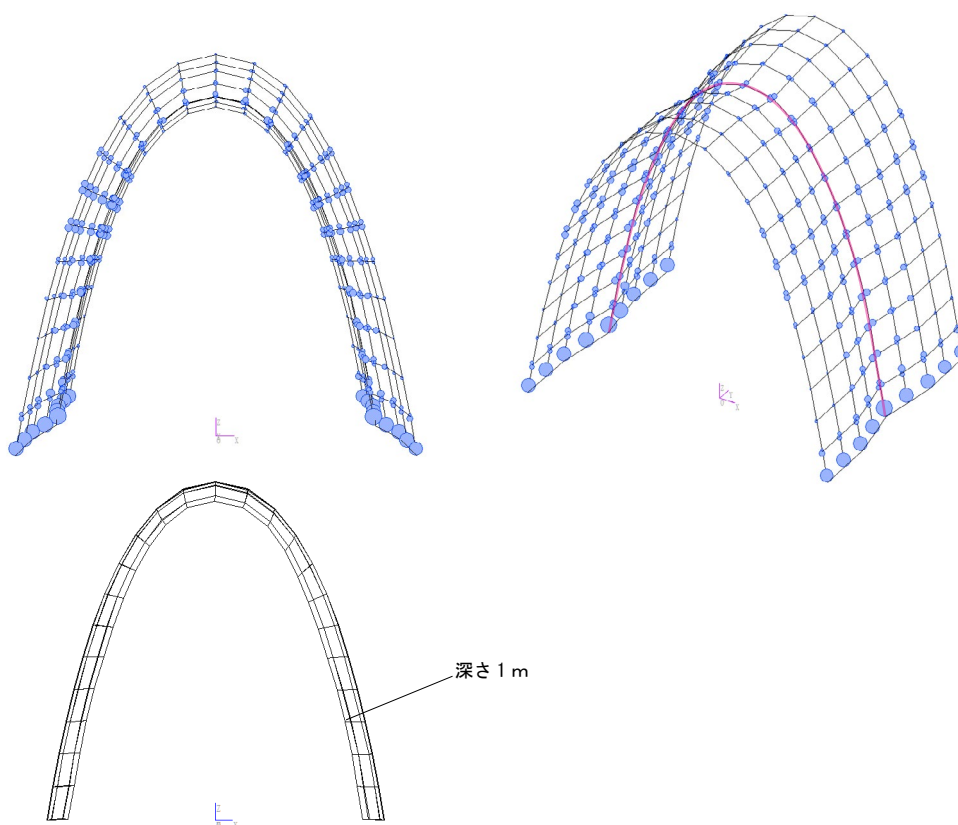


図 3.20 谷状の窪み (左: 正面図, 右: アクソメ, 下: 変形図)

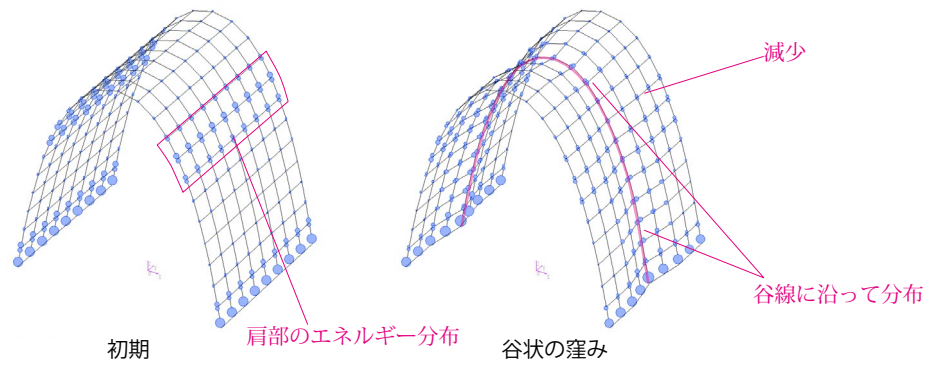


図 3.21 初期形状と谷状窪みモデルの比較

これは谷状部の剛性が高まり、応力が集中したためと考えられる。谷形状はV字型の梁のような役割を果たし、谷の両側の部分は谷部に支えられてあまり応力を負担せず、梁の役割を果たす谷部に応力が集中すると考えられる。

次に、上部、中腹部、下部にそれぞれに谷状の窪みを与えたモデルをみる。それぞれ図 3.22, 図 3.23, 図 3.24 に示す。

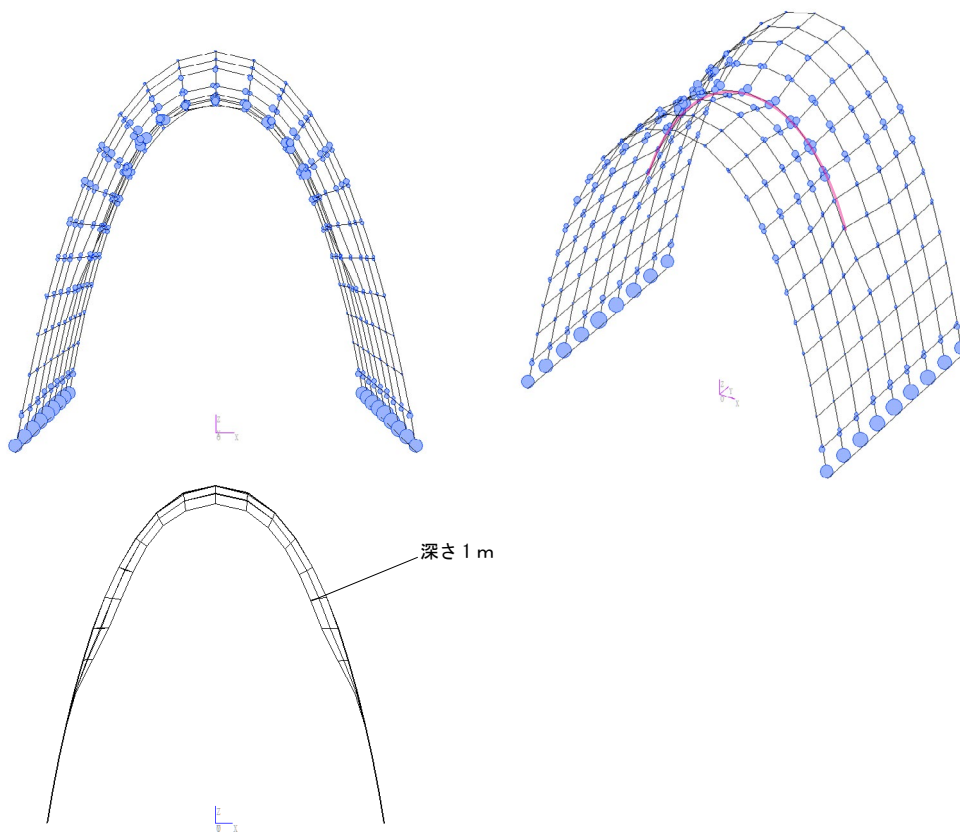


図 3.22 上部に谷状の窪み [C1] (左：正面図, 右：アクソメ, 下：変形図)

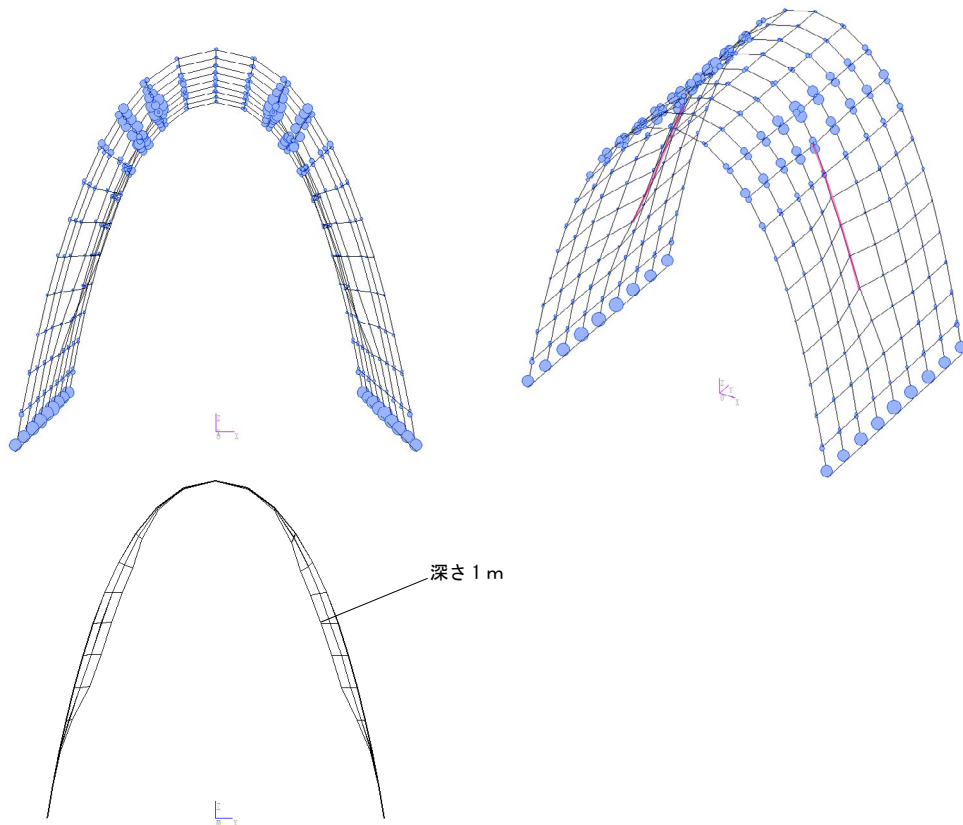


図 3.23 中腹部に谷状の窪み [C2] (左: 正面図, 右: アクソメ, 下: 変形図)

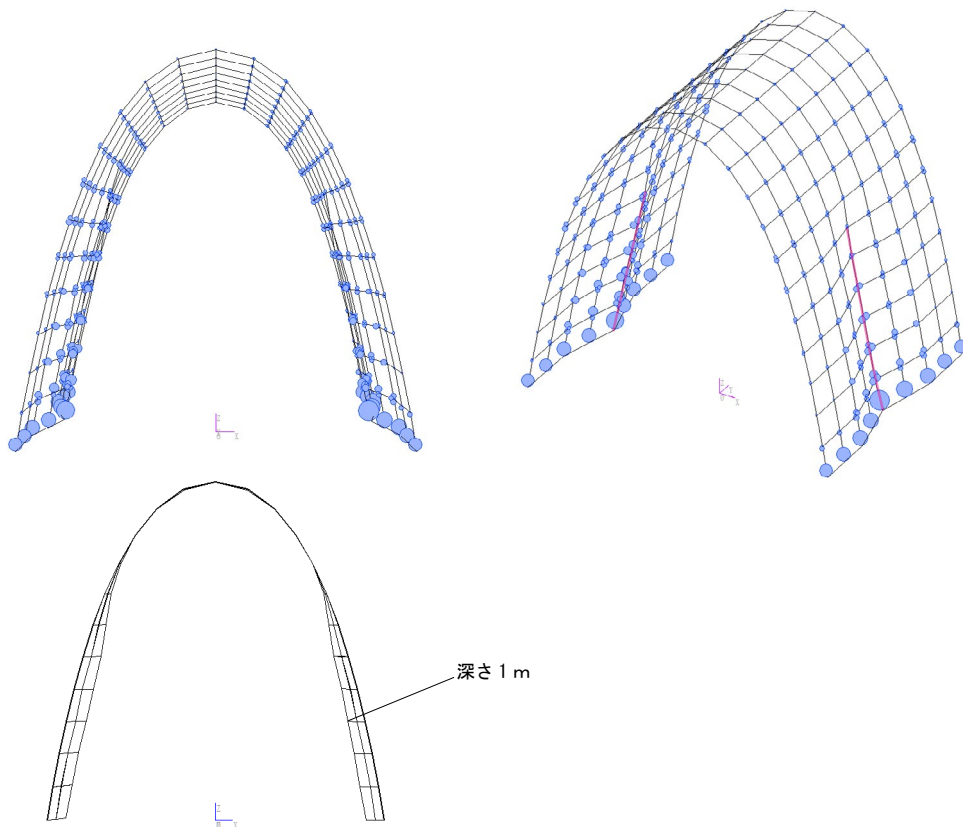


図 3.24 下部に谷状の窪み [C3] (左: 正面図, 右: アクソメ, 下: 変形図)

上部に谷形状を設けた図 3.22 と下部に設けた図 3.24 のモデルでは、肩部のエネルギー吸収が少なくなり谷に沿ってエネルギー吸収がみられる。一方、中腹に谷形状を設けた図 3.23 のモデルでは、肩部のエネルギー吸収部が上へ移動しており、凹形状の場合（例えば図 3.5）の分布に類似する。谷形状の位置によってこの形状の働きが異なると考えられる。

頂部では梁のような働きを持ち、脚部では谷形状が方杖のような配置となり応力が集中するものと解釈できる。この谷状部分でエネルギーが吸収できれば制振ダンパーのような効果が期待できるかもしれない。一方、中腹部では曲面が波状になったことによって局所的に剛性が高まる効果が表れると考えられる。

また、図 3.22 と図 3.24 を踏まえて図 3.20 の全体に操作を行ったモデルを考察すると、いずれも谷状形状の部位に集中する吸収エネルギー分布がみられ、図 3.20 は図 3.22 の上部と図 3.24 の下部を足し合わせたような分布となっている。これは上下の谷形状の効果が同時にあらわれた分布であったと解釈できる。

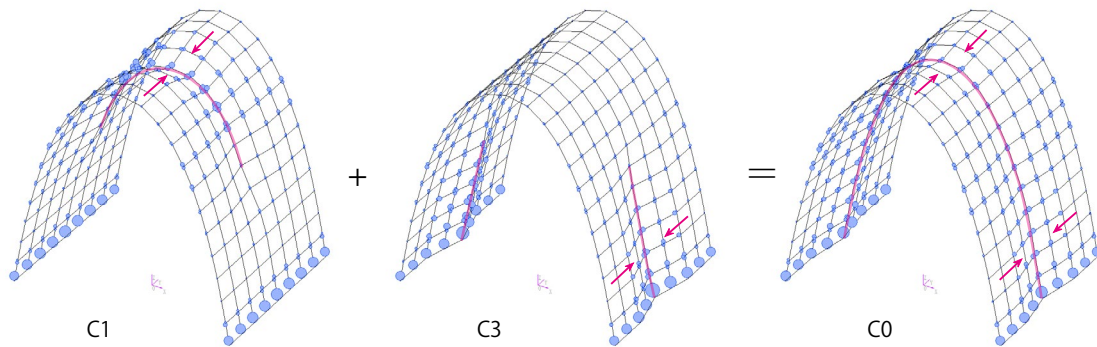


図 3.25 上部谷形と下部谷形の連結

以上から谷状の形態操作と吸収エネルギー分布の関係について次のことが言える。

3. 頂部や脚部に谷状の形状を与えると、その谷部に吸収エネルギー分布が集中する。
4. 中腹部の谷状形は凹みと同じ効果である。

3.1.4 アーチ形の形状操作の複合

ここまでは肩部と足元の操作を別々に見てきたが、ここでは形状操作を複合させた場合の吸収エネルギー分布について検討を行う。図 3.26, 図 3.27 は肩部の下寄りの凹みと足元の凹み操作の組合せである。

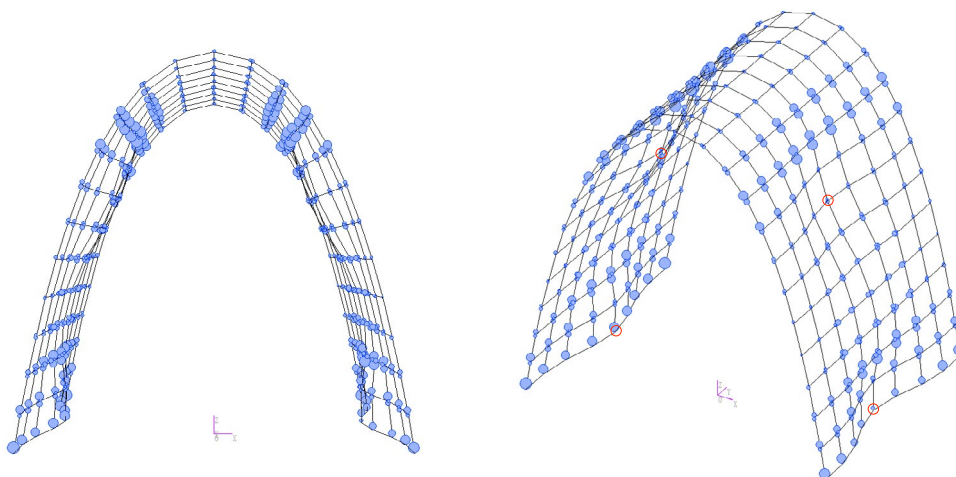


図 3.26 A1 + A5 (左: 正面図, 右: アクソメ)

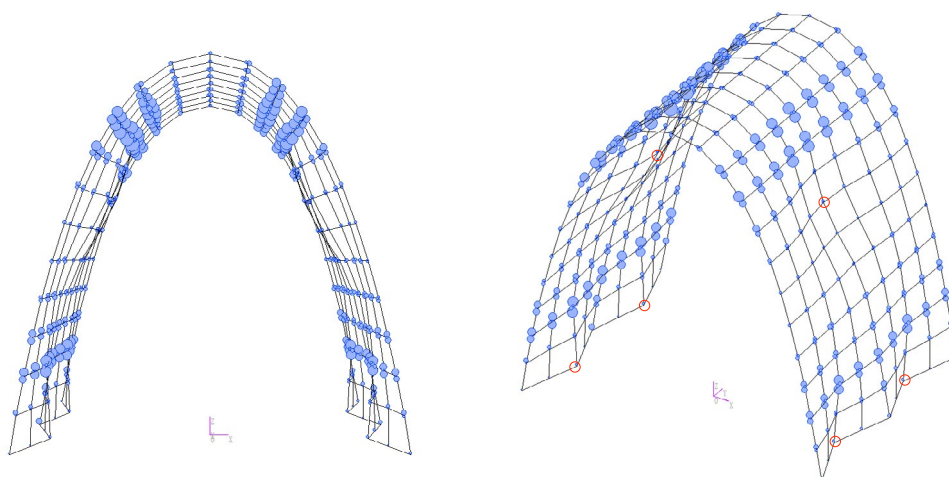


図 3.27 A1 + A6 (左: 正面図, 右: アクソメ)

それぞれを見比べると、肩部の操作については、図 3.26、図 3.27 ともに肩部下寄りの凹みにより肩部エネルギー吸収部が上へ移動しており、足元の操作による影響は見られない。足元の操作についても、足元を1つ凹ませた図 3.26 では凹み部の分布だけが上へ移動し、2カ所を凹ませた場合には分布が全体的に移動し、肩部の影響はない。これらはそれぞれの操作を単独で行った場合の結果と同一であり、操作を同時に行なった場合でも、それぞれの効果は変わらず、エネルギー分布の変化は重ね合わせ状になる。

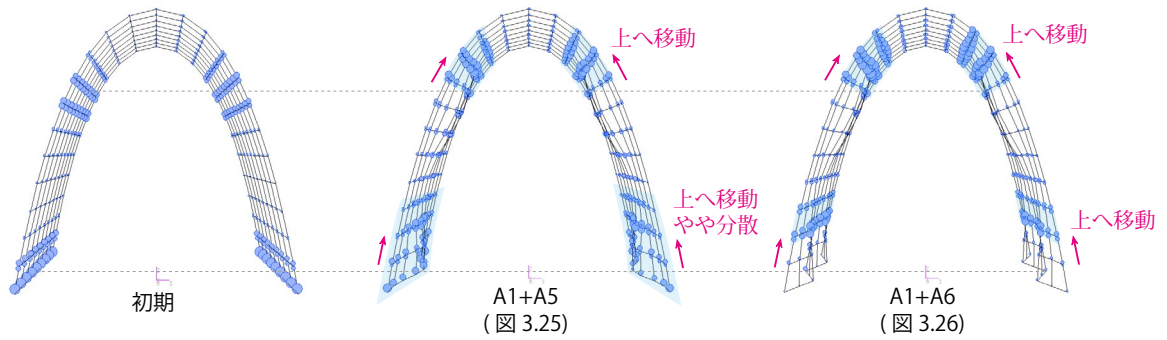


図 3.28 足元の操作の違いによる比較

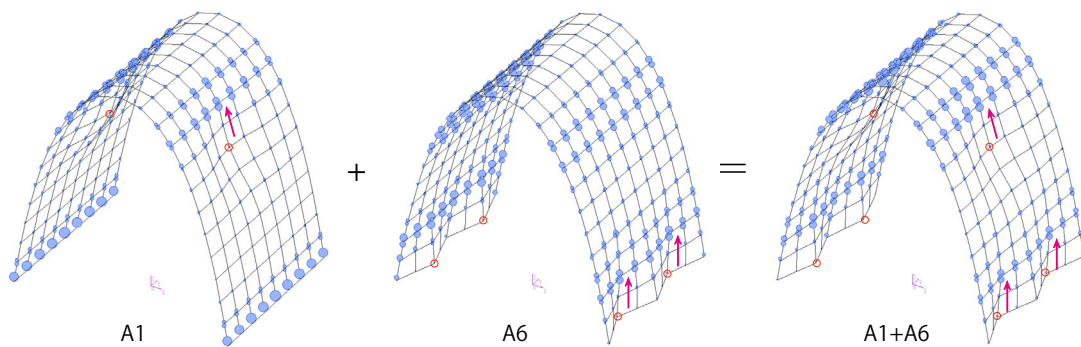


図 3.29 A1 と A6 のエネルギー分布の重ね合わせ

次の図 3.30 は、頂部の谷状操作と足元 2ヶ所を凹ませる操作の組合せである。

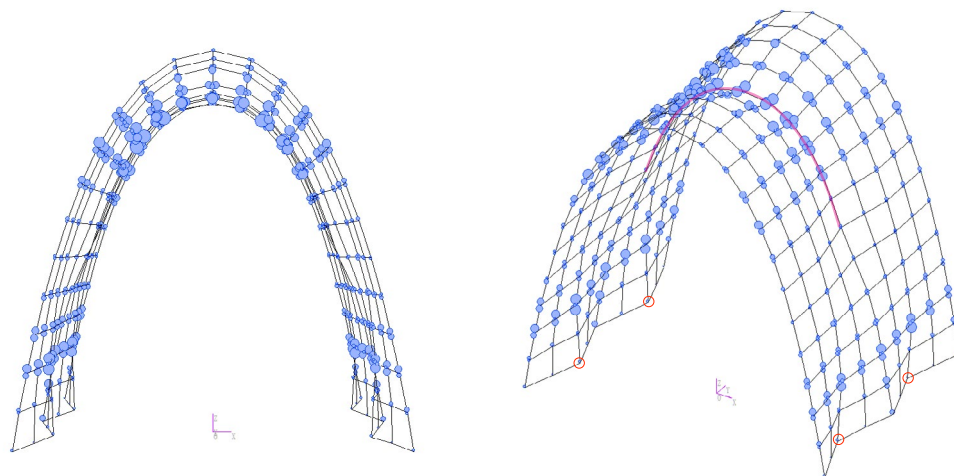


図 3.30 C1 + A6 (左：正面図, 右：アクソメ)

図 3.30 の上半分では頂部の谷状の窪みにより肩部の分布がみられなくなり、谷部を中心にエネルギー分布が集まるようになる。足元は 2ヶ所ずつの凹みにより分布が全体的に上方へ移動する形となる。これらもそれぞれを単独で操作を行った場合と同じ効果が得られる。

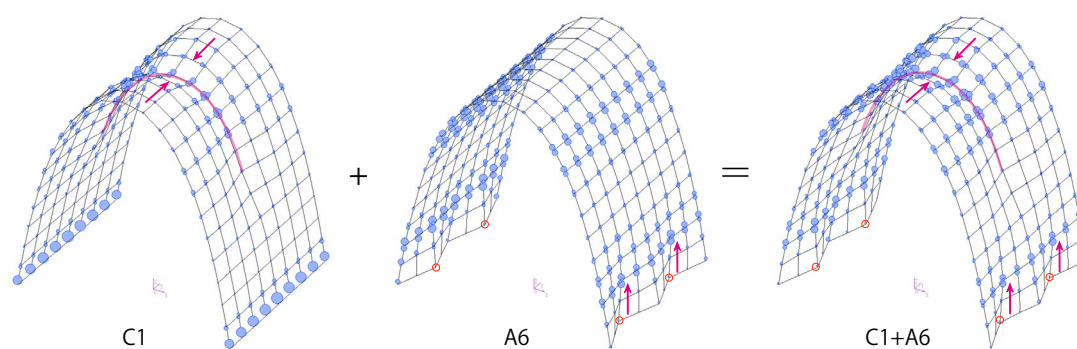


図 3.31 C1 と A6 のエネルギー分布の重ね合わせ

この検討からは、複数の形状操作の組合せについて次のことが示唆される。

5. 複数の形状操作を同時に行うときの吸収エネルギー分布の変化は、操作を個別に行う場合の分布の変化の重ね合わせで表される。

3.1.5 まとめ

以上からアーチ形の基本形状操作と吸収エネルギー分布の関係について得られた知見は、次のようになる。

1. アーチ形のエネルギー分布発生個所に凹凸を作成すると、分布は凹凸を避けるように移動する。
2. 分布移動の効果の範囲が狭い場合、凹凸を複数横に並べるにより幅広い範囲の分布を移動させることができる。
3. 頂部や脚部に谷状の形状を与えると、その谷部に吸収エネルギー分布が集中する。
4. 中腹部の谷状形は凹みと同じ効果である。
5. 複数の形状操作を同時に行うとき、吸収エネルギー分布の変化は操作を別々に行う場合の分布の重ね合わせで表される。

3.2 ドーム形の基本操作とエネルギー分布

3.2.1 解析概要

本節で用いるモデルの初期形状と設計諸元を図 3.32、表 3.2 に示す。このモデルは高さ 10 m 底面直径 40 m の回転体から四面を切り落とした形状である。支点は四隅それぞれ 3 点ずつ接地し、支持条件はピン支持である。その他の節点は全ての方向に自由である。部材断面は円形鋼管 $\text{O} - 250 \times 6 \text{ mm}$ とし、さらに仕上げ材として平方メートルあたり 0.4 t の質量が載るものとする。地震波は 75 kine に基準化し、入力方向は図の X 方向とする。

説明のため、図に赤で示す配置を十字配置、青で示す配置を対角配置と呼ぶこととする。また、モデルの振動の方向が左右の方向になるように、前後左右を決める。

表 3.2 設計諸元

部材断面	$\text{O} - 250 \times 6 \text{ (mm)}$
材料	SN400
支持条件	ピン支持
仕上げ材質量	$0.4 \text{ (t/m}^2\text{)}$
1 次固有周期	1.2 (s)
基準化	75 (kine)

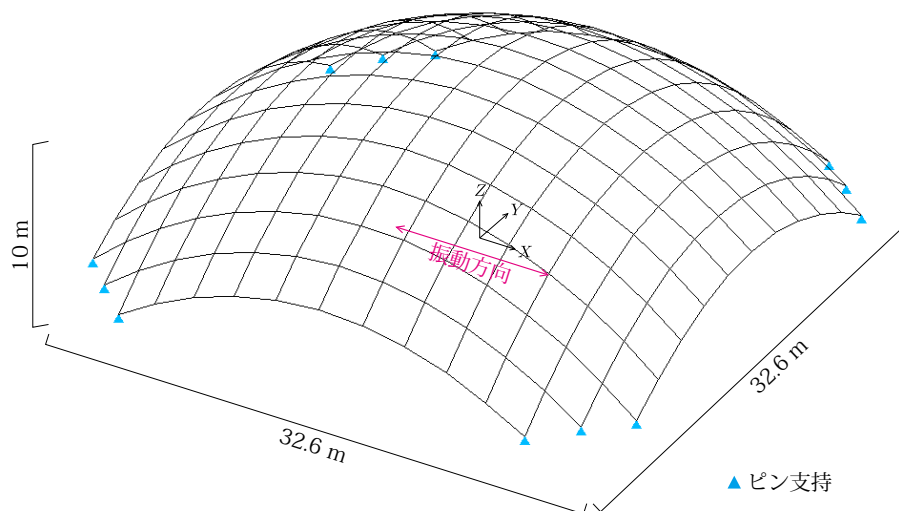
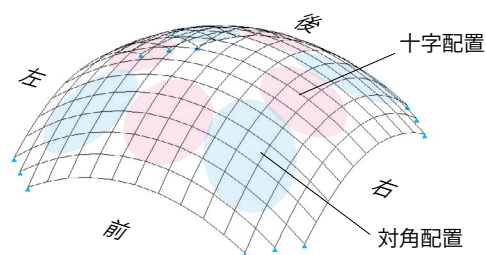


図 3.32 初期形状

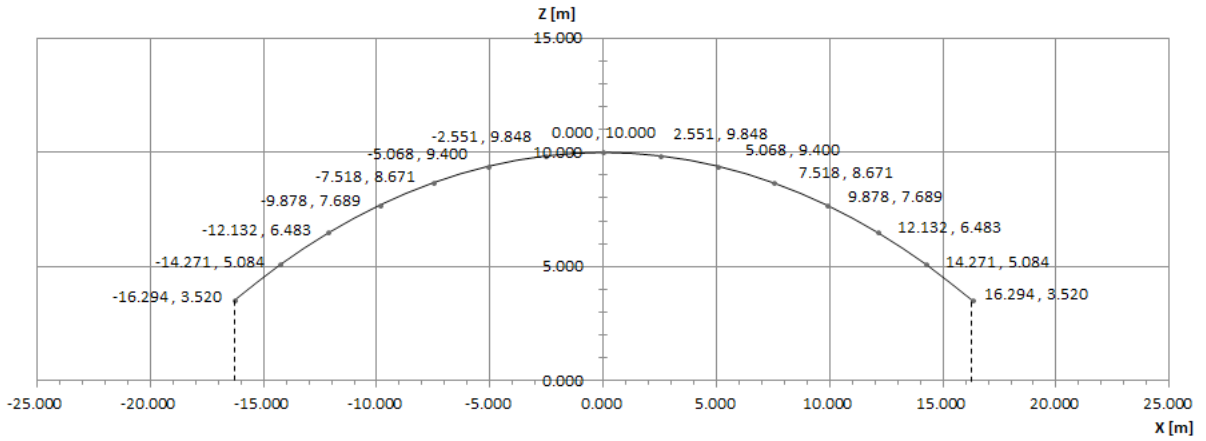


図 3.33 初期形状の節点座標

初期形状での吸収エネルギー分布を図 3.34 に示す。吸収エネルギーは前後のエッジ部 (図の PP' , QQ' 間) に帯状に分布する。中央部や左右のエッジ部には吸収エネルギー分布は見られない。これは振動に対して PP' , QQ' 間のアーチ形状が効いているためと考えられる。

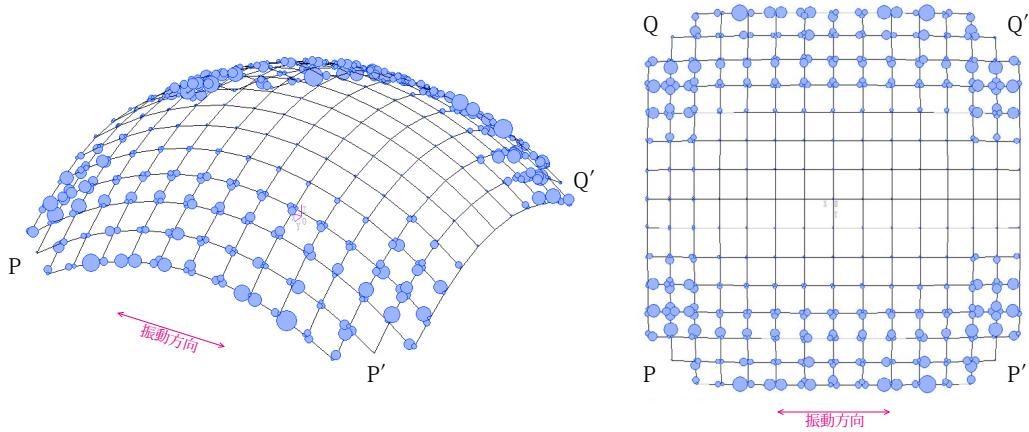


図 3.34 初期形状の吸収エネルギー分布 (右: アクソメ, 左: 上面図)

3.2.2 ドーム形と凹形の形状操作

ドーム形について凹み形状を与えた時のエネルギー分布を検討する。凹みの大きさはアーチ形と同様に赤印で示す制御点から3節点の範囲とし、凹みの深さは2 mとする。凹みの操作はXY方向には動かさず、Z方向のみとする。

まず、ドームの上から見て十字の位置に凹みを設けた場合を検討する。図3.35は中央前から4番目と後ろから4番目の点とその周囲の点を正弦曲線に沿う形で凹ませたモデルである。図3.36は同様に前後3番目の点を凹ませたモデルである。

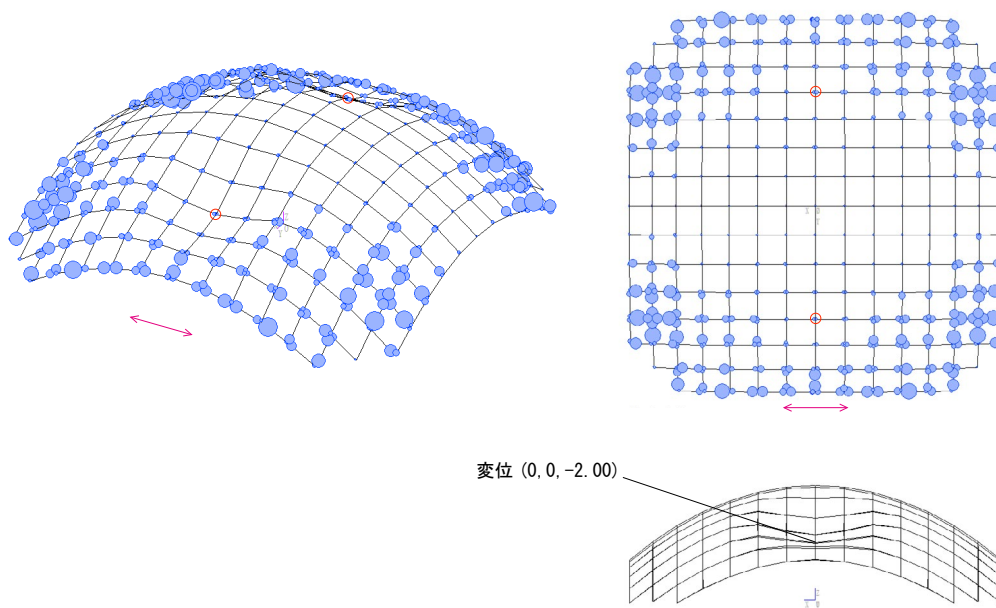


図 3.35 前後エッジから4の点を中心に凹み [D1] (左:アクソメ, 右:上面図, 下:変形図)

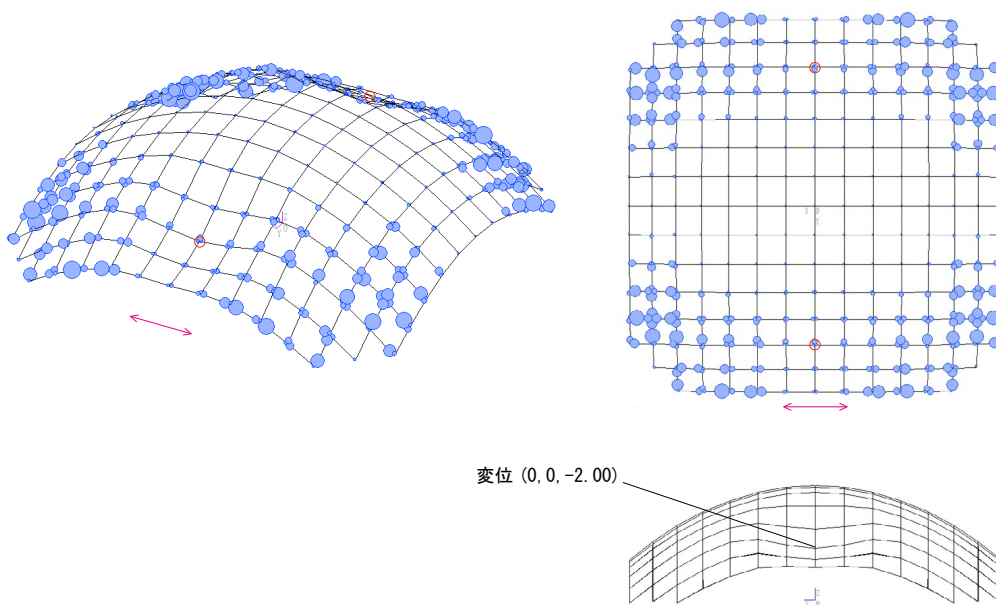


図 3.36 前後エッジから3の点を中心に凹み [D2] (左:アクソメ, 右:上面図, 下:変形図)

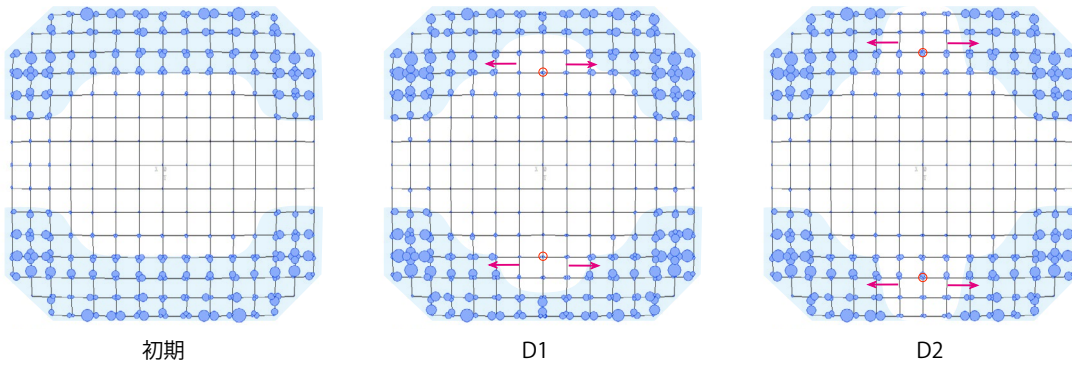


図 3.37 中心点の位置による比較

吸収エネルギー分布を比較すると、凹みを設けた部分のエネルギー吸収が減少し、分布が足元の方へ移動することがわかる。これはアーチ形でも見られたように、凹凸の周囲の剛性が局所的に高まり応力が移動したためと考えられる。

次の図 3.38 は凹みの配置を 90 度変えたものである。このモデルは左右エッジから 4 番目の点を中心に凹ませている。吸収エネルギー分布を図 3.33 の初期形状と比較して大きな差はない。ここではエネルギー分布が存在しない領域へ凹凸状の形状操作を行っても分布を変える効果はないといえる。

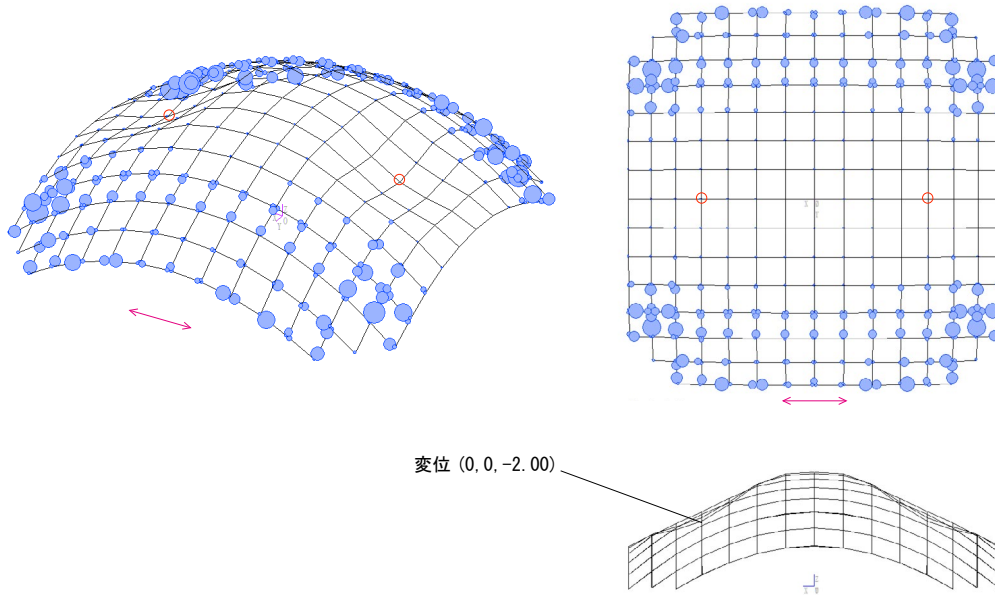


図 3.38 左右エッジから 4 の点を中心に凹み [D3] (左: アクソメ, 右: 上面図, 下: 変形図)

さらに、十字の4カ所を凹ませた場合は図 3.39, 図 3.40 のようになる。それぞれエッジから4番目の点、3番目の点を中心に凹ませたモデルである。

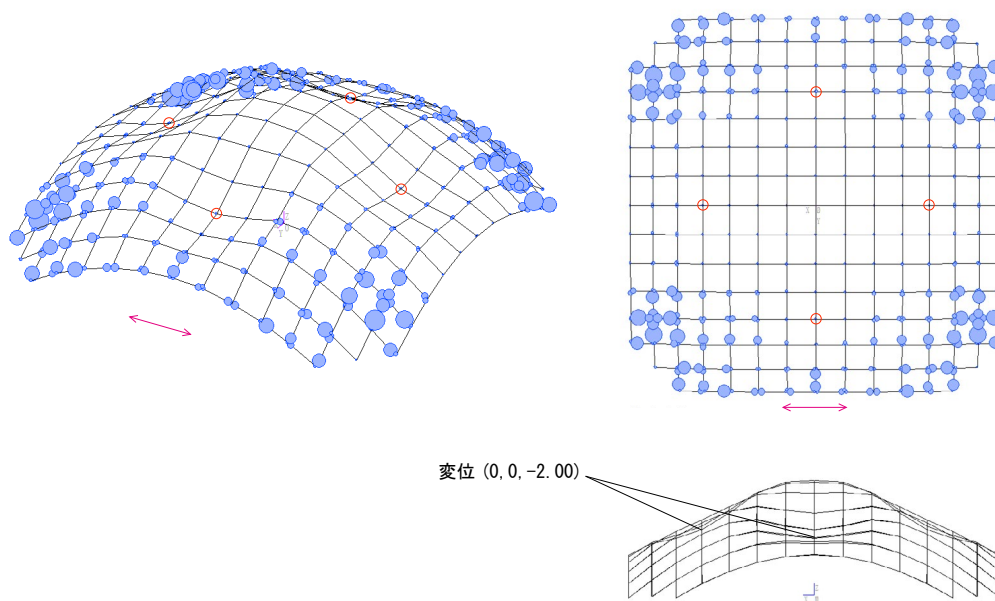


図 3.39 前後左右エッジから4の点を中心に凹み [D4](左:アクソメ, 右:上面図, 下:変形図)

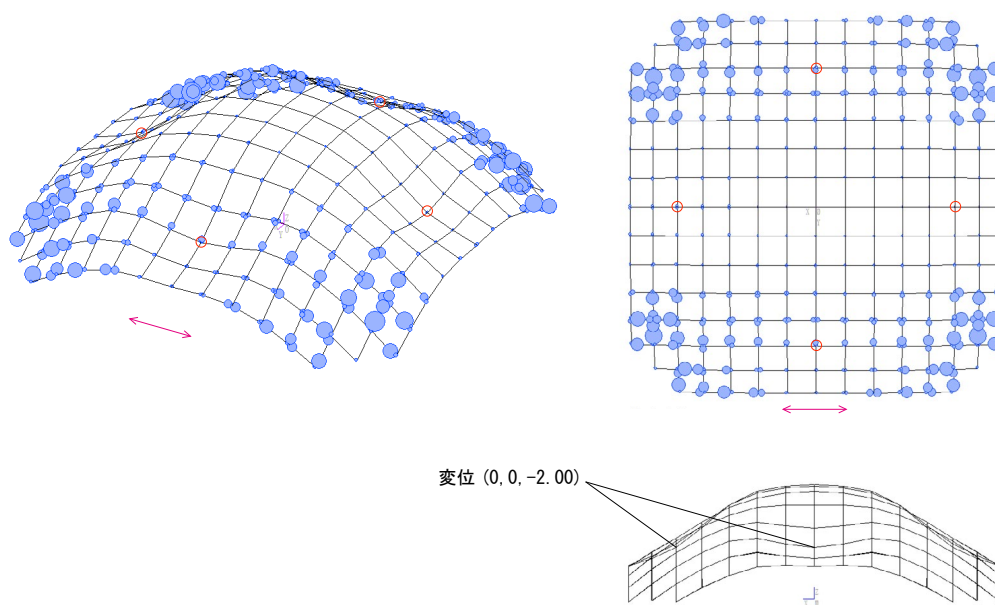


図 3.40 前後左右エッジから3の点を中心に凹み [D5](左:アクソメ, 右:上面図, 下:変形図)

吸収エネルギー分布を見ると、凹みを4カ所に作成したモデルの吸収エネルギー分布は、前後2カ所の場合のものと同様の結果となる。左右に凹みを作成した際の変化を図3.41にまとめた。それぞれの分布を比較すると、図3.38の形状操作D3は単体では効果がないが、組み合わせることにより形状操作D1やD2の効果をやや強める効果があるようである。

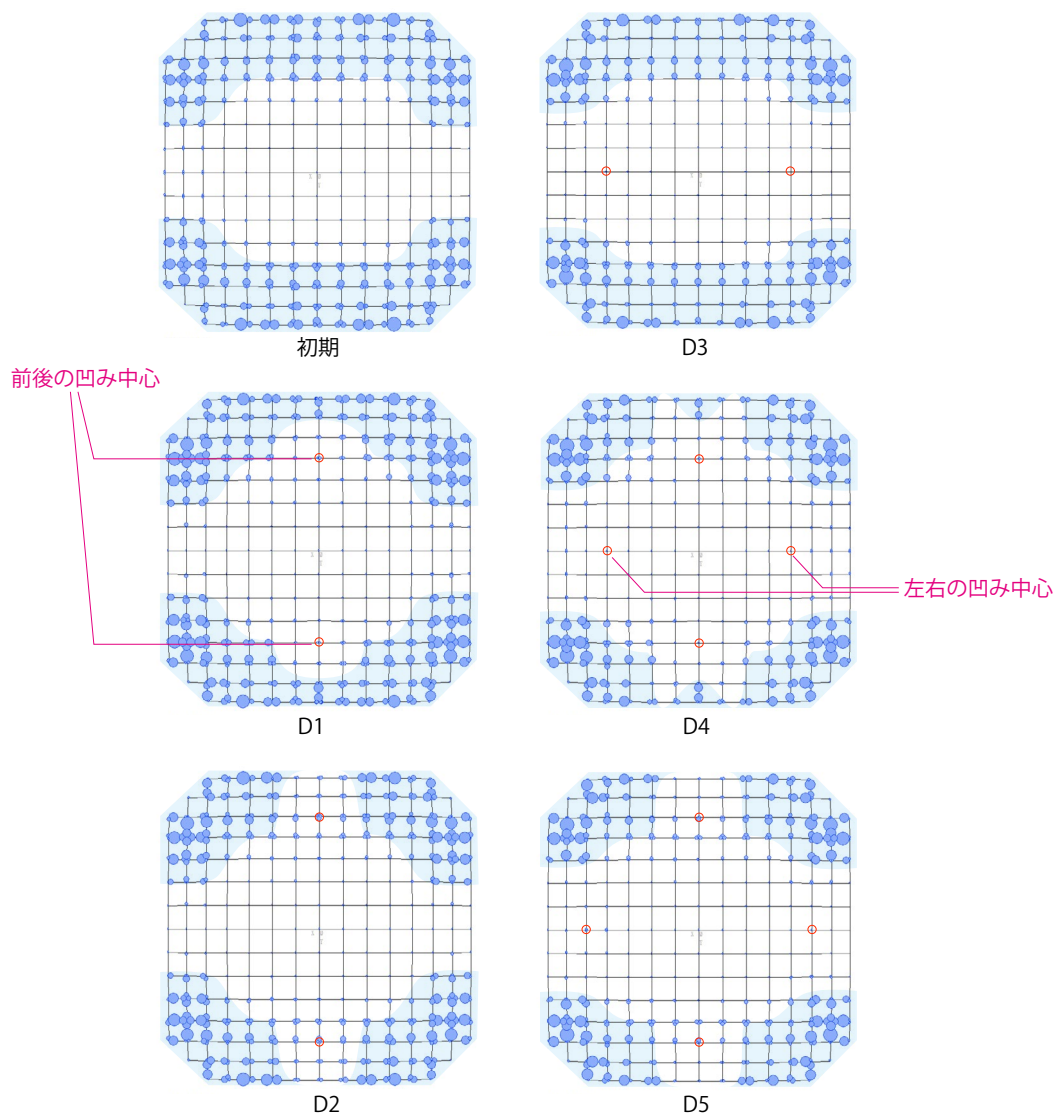


図 3.41 十字配置の凹み比較

次に、対角に凹みを設けたモデルを考える。ここでは点の位置を少しずつずらした5通りのモデルを検討する。それぞれ左右のエッジ、前後のエッジから (5,3)(5,4)(5,5)(4,4)(4,5) の点を中心に対角に4カ所を凹ませたモデルであり、順に図 3.42 から図 3.46 に示す。

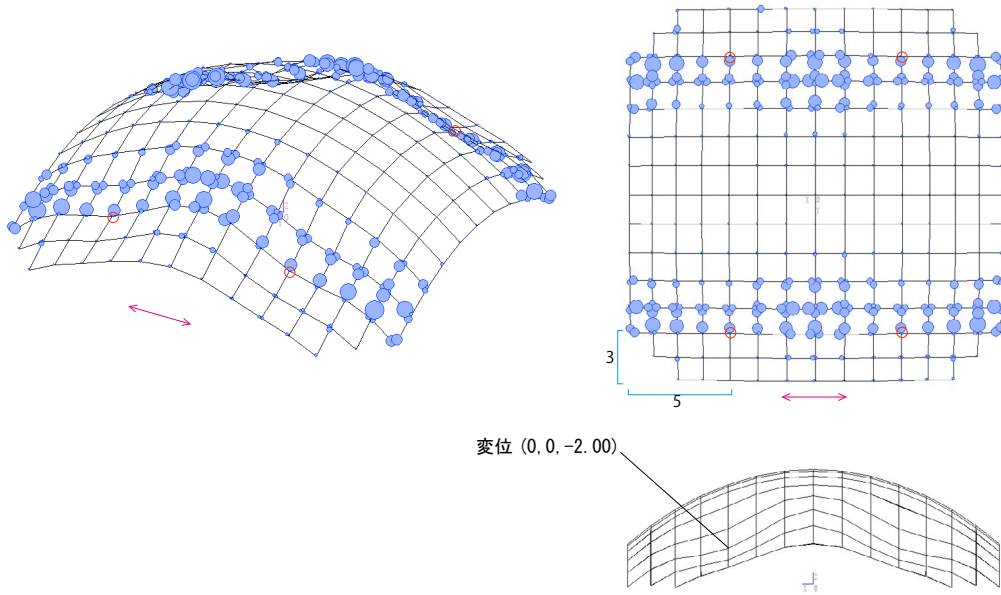


図 3.42 エッジから 5,3 の点を中心に凹み [E1] (左:アクソメ, 右:上面図, 下:変形図)

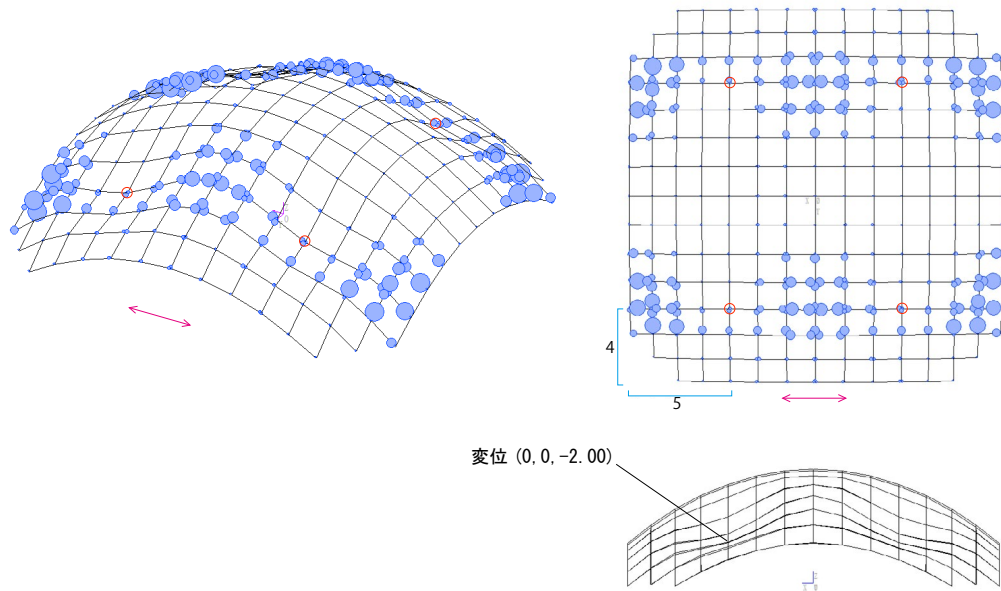


図 3.43 エッジから 5,4 の点を中心に凹み [E2] (左:アクソメ, 右:上面図, 下:変形図)

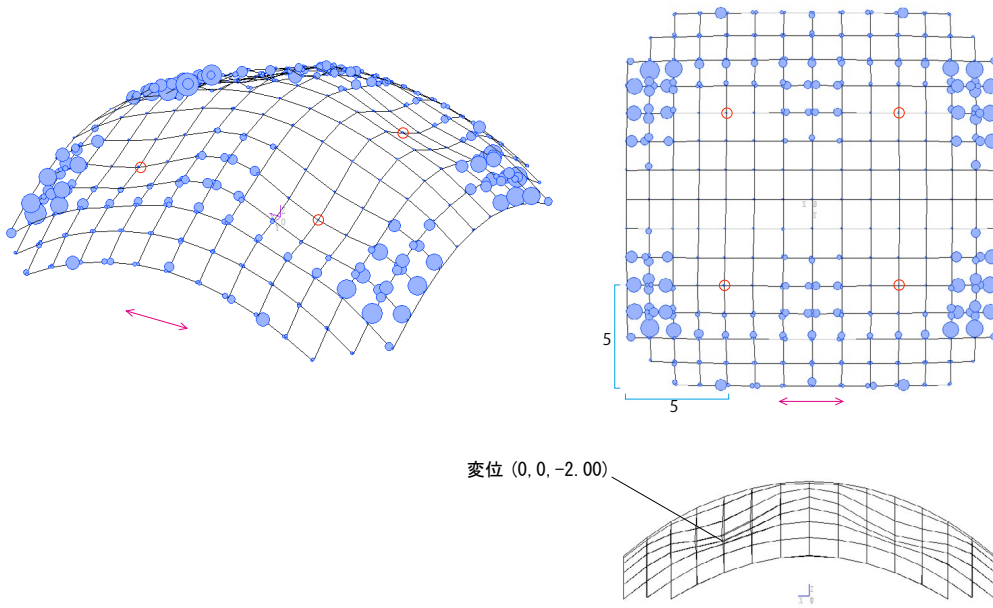


図 3.44 エッジから 5,5 の点を中心に凹み [E3] (左: アクソメ, 右: 上面図, 下: 変形図)

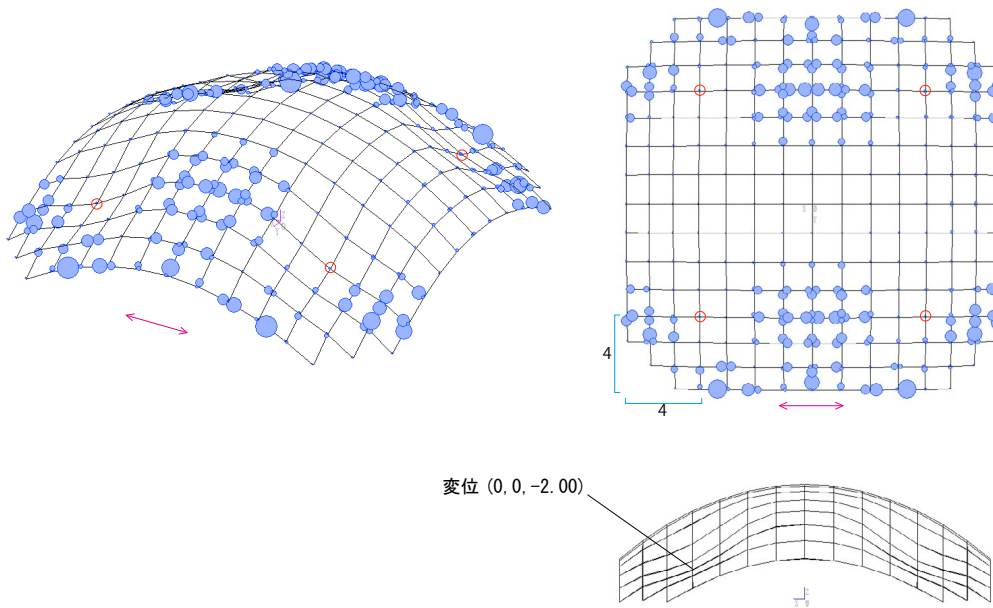


図 3.45 エッジから 4,4 の点を中心に凹み [E4] (左: アクソメ, 右: 上面図, 下: 変形図)

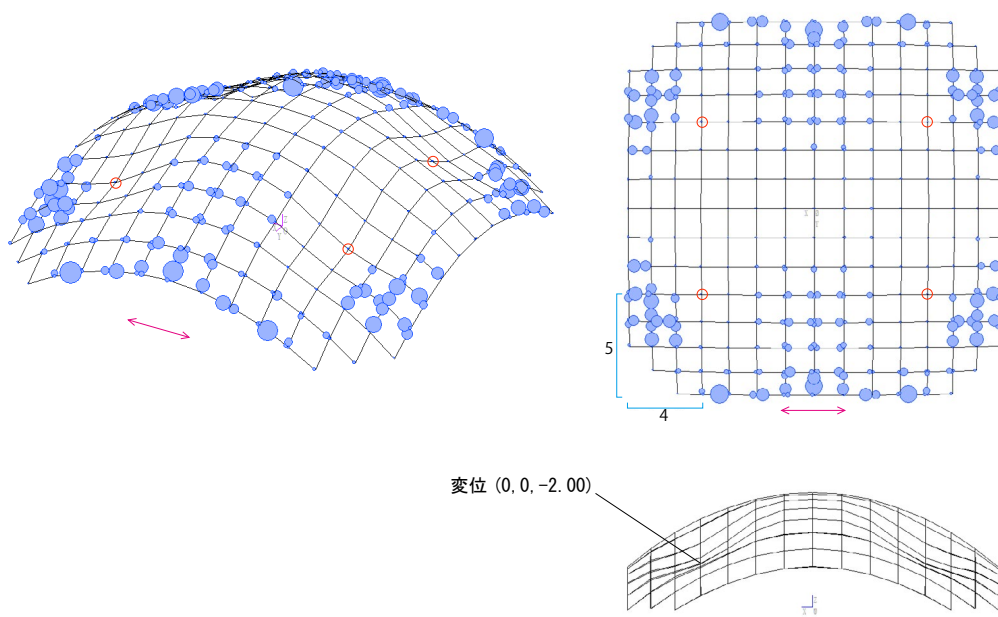


図 3.46 エッジから 4,5 の点を中心に凹み [E5] (左:アクソメ,右:上面図,下:変形図)

第3章 形状の基本操作と分類

図 3.45 と図 3.46 (E4, E5) においては、凹み部の吸収エネルギー分布が減少し、前後の脚部と中心部の計6カ所に集まったような分布となる。一方、最もエッジ寄りに凹みを配置した図 3.42 (E1) では前後のエッジ部でのエネルギー吸収がほぼなくなり、内側に帯状のエネルギー吸収部が形成される。図 3.43, 図 3.44 (E2, E3) では両者の中間のような分布が観察される。

それぞれの上面図左下部分だけを取り出して図 3.47 にまとめた。これを見ると、凹みの中心座標とエネルギー分布には連続的な相関性が推察される。たとえば、足元でのエネルギー吸収はこのなかでは E3 が最も大きく E1 や E4 の方へ向かって小さくなる。また、中央部のエネルギー吸収は E1 で最も大きく、E3 や E5 で小さくなる。

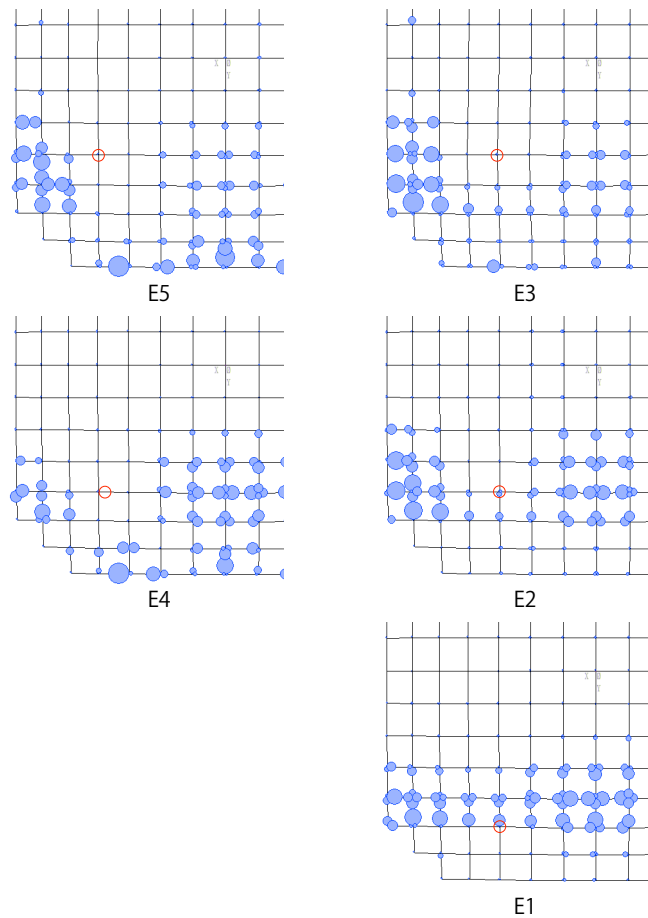


図 3.47 凹みの中心位置による比較 上面図隅部

以上から、次のことが言える。

1. ドーム形に対する凹み操作には凹み部のエネルギー分布を減少させる効果がある。
2. 1のうち凹みを前後の縁寄りに2ヶ所ずつ作ると前後縁部でのエネルギー吸収が大きく減少する。

3.2.3 ドーム形と凸形の形状操作

次にドーム形に上方向への膨らみを作成した場合の吸収エネルギー分布を確認する。図 3.48, 図 3.49 は中央前後に膨らみを設けたモデルであり、下向きに凹ませた図 3.35, 図 3.36 の逆向き操作に相当する。ここでは凹凸の範囲はそのままに膨らみの高さは 0.6 m とする。

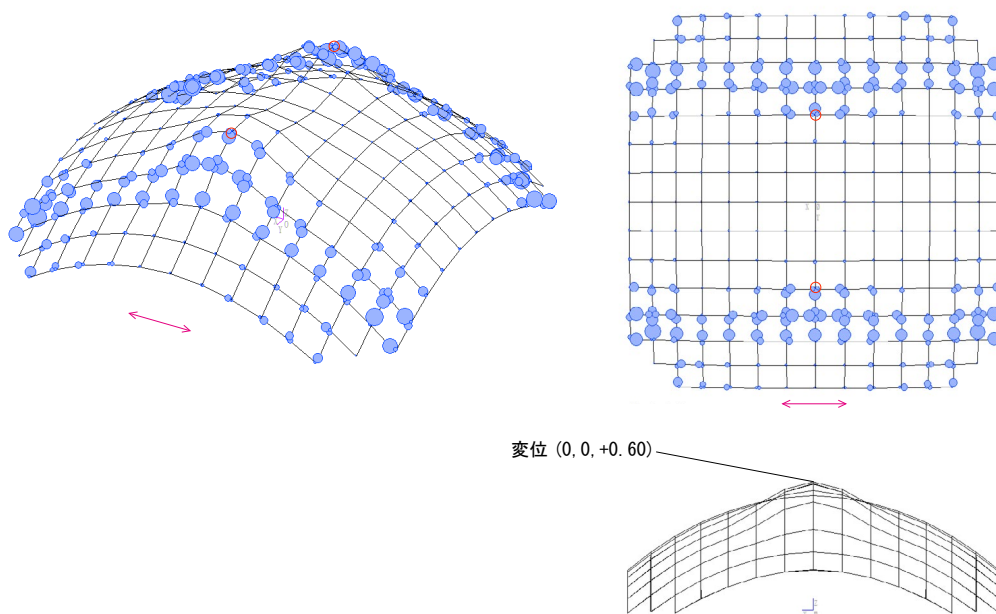


図 3.48 エッジから 5 の点を中心に膨らみ [F1] (左: アクソメ, 右: 上面図, 下: 変形図)

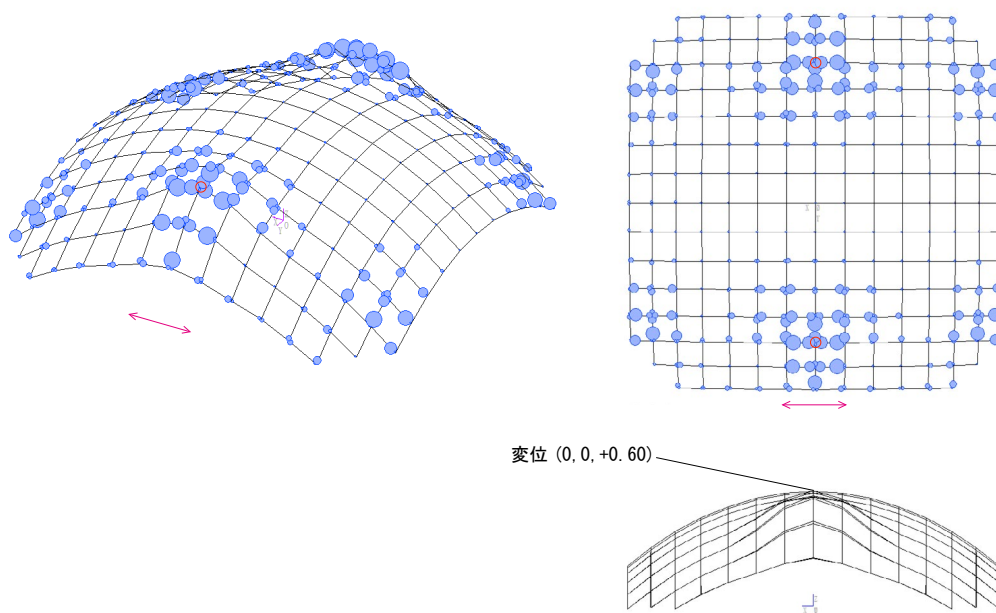


図 3.49 エッジから 3 の点を中心に膨らみ [F2] (左: アクソメ, 右: 上面図, 下: 変形図)

図を見ると、吸収エネルギー分布は下向きに凹ませた場合とは全く異なる分布となる。この分布はむしろ対角を凹ませた図 3.42 や図 3.44 に類似する。図 3.50 のように形状を比較すると、双方とも中央から足元のラインに窪みができている。この形状が分布を生み出している可能性がある。

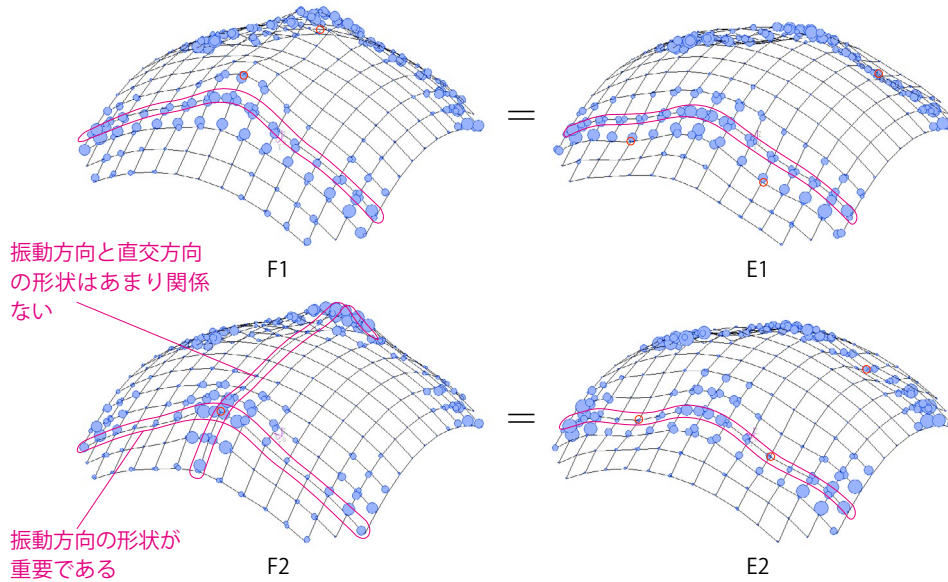


図 3.50 中央を膨らませた場合と対角を凹ませた場合のエネルギー分布

対角線上に膨らみを作成した場合のエネルギー分布は図 3.51, 図 3.52 のようになる。図 3.51 はエッジから (5,5) の点を膨らませたモデル、図 3.52 は (3,3) の点を膨らませたモデルである。膨らみの高さは 1.0 m である。

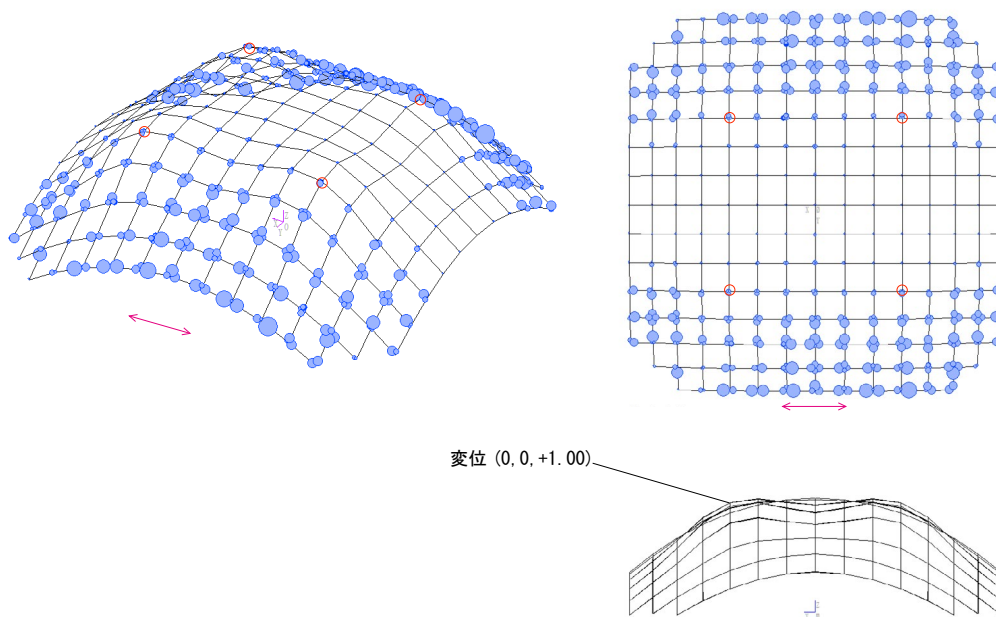


図 3.51 エッジから 5 の点を中心に膨らみ [F3] (左: アクソメ, 右: 上面図, 下: 変形図)

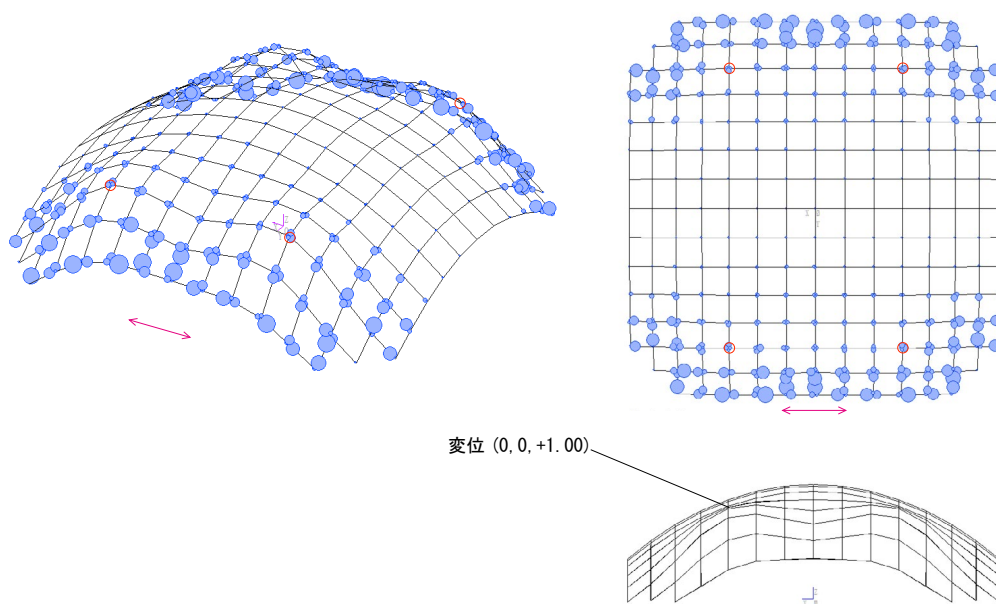


図 3.52 エッジから 3 の点を中心に膨らみ [F4] (左:アクソメ,右:上面図,下:変形図)

図 3.51 をみると、やや内側へ広がったような分布である。一方、図 3.52 のようにエッジ寄りに膨らみを持ってくると、エネルギー吸収部が今度は外側に寄った分布となることがわかる。

以上から、次のことが言える。

3. 中央を膨らませる操作は対角を凹ませる操作と同様の吸収エネルギー分布となる。
4. 対角を膨らませる操作は吸収エネルギー分布の幅を変える効果がある。

3.2.4 ドーム形と谷形の形状操作

最後に、谷形の窪みを持つドーム形の吸収エネルギー分布を確認する。図 3.523 図 3.54 は 1 本ずつ谷状の形状を作成したモデル、図 3.55, 図 3.56 は 2 本ずつ作成したモデルである。谷形状の幅は両側 2 節点の範囲とし、深さはそれぞれ約 1.5 m, 1.3 m である。

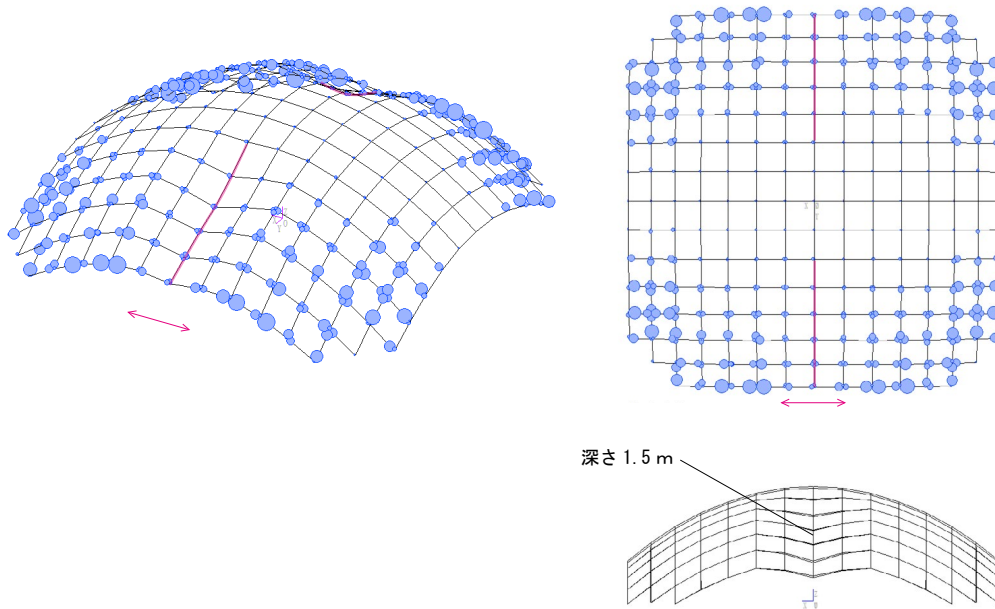


図 3.53 前後エッジに 1 本ずつ谷形状 [G1] (左: アクソメ, 右: 上面図, 下: 変形図)

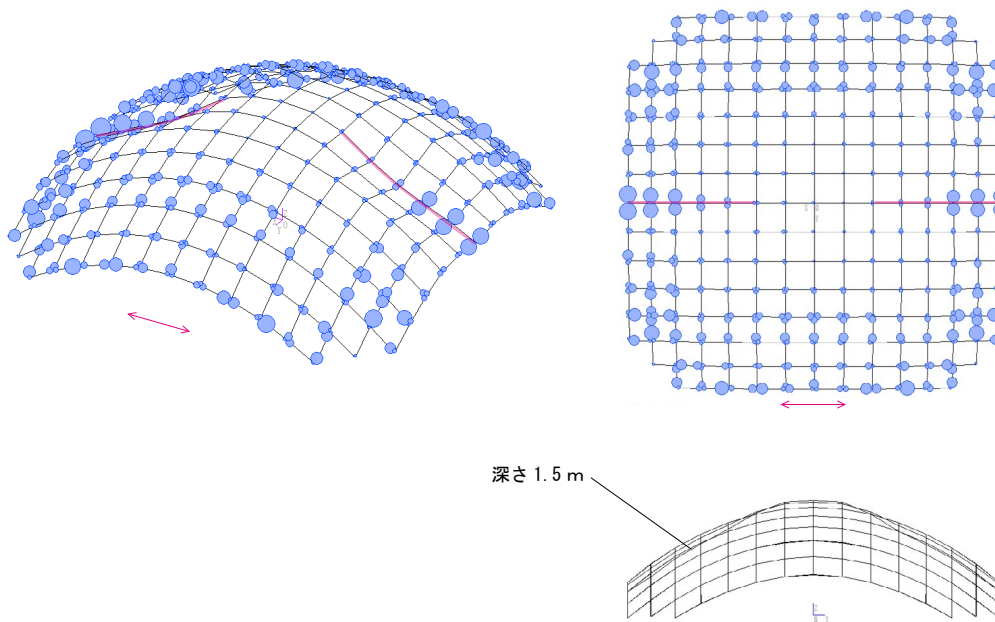


図 3.54 左右エッジに 1 本ずつ谷形状 [G2] (左: アクソメ, 右: 上面図, 下: 変形図)

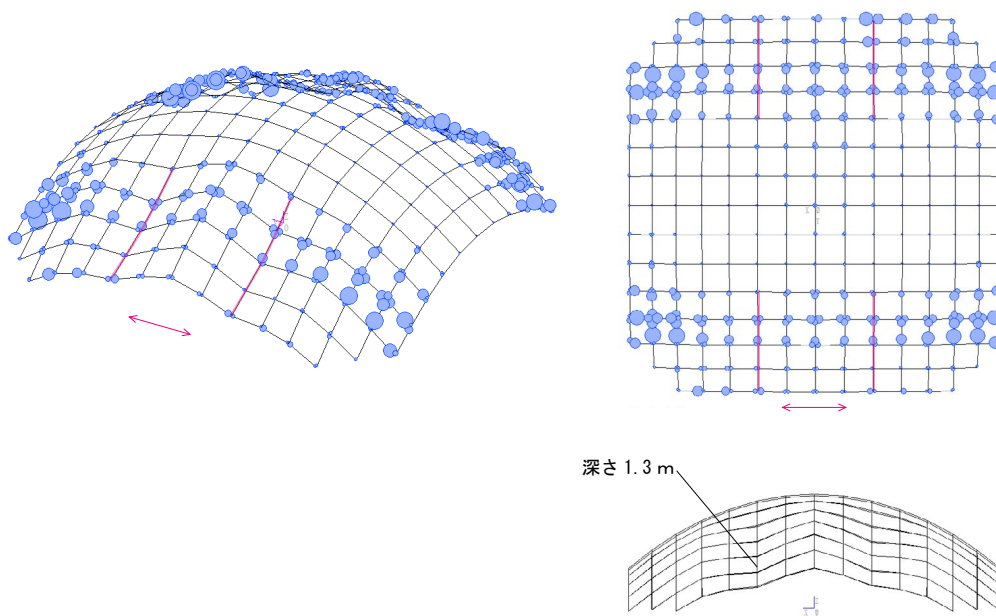


図 3.55 前後エッジに2本ずつ谷形状 [G3] (左: アクソメ, 右: 上面図, 下: 変形図)

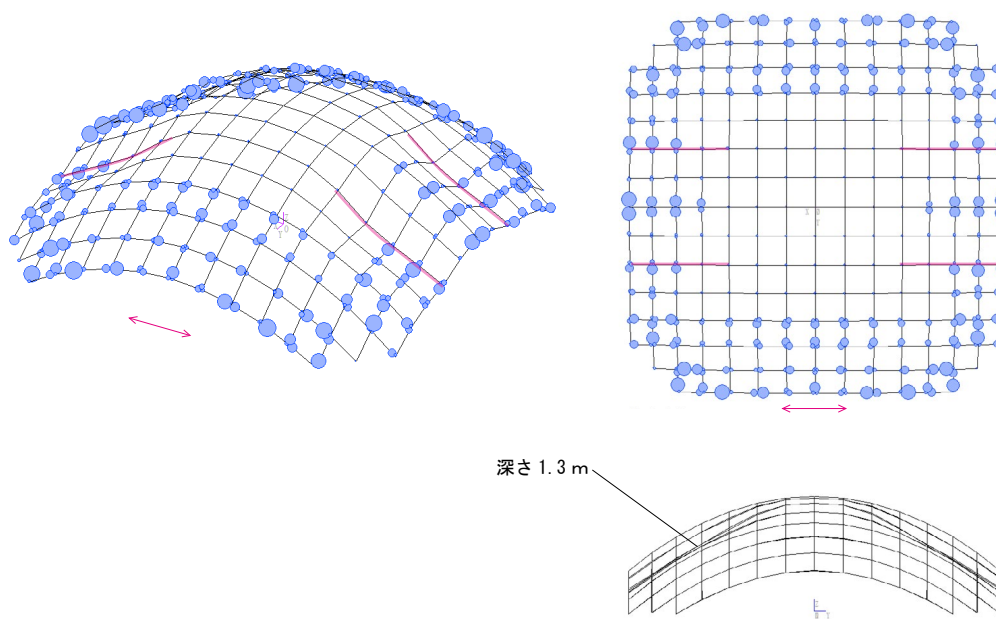


図 3.56 左右エッジに2本ずつ谷形状 [G4] (左: アクソメ, 右: 上面図, 下: 変形図)

前後のエッジ上の中心に谷形状を設けた図 3.53 は、十字に凹みを作成した図 3.35 と同様の分布である。一方、谷形状を2本設けた図 3.55 は、対角に凹みを作成した図 3.44 に類似している。つまり、図 3.57 に示すように谷形状を設けることは同じ場所に凹みを設けることと操作として同様であるといえる。

一方、左右のエッジに谷状窪みを設けた図 3.54, 図 3.56 では新たに左右のエッジ部分に吸収エネルギー分布が発生する。これはアーチで下部分に谷形状を作成した場合に谷に沿ってエネルギー吸収が発生したことに類似している。つまり、振動方向と同じ方向を向いた谷状の形状にはエネルギー分布が集まる効果があると考えられる。

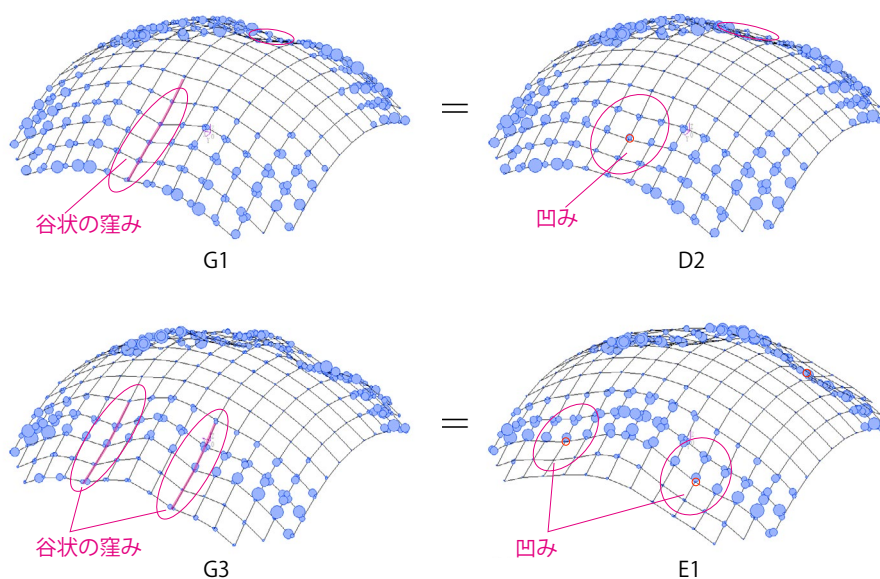


図 3.57 前後エッジの谷状の形状操作と凹み操作のエネルギー分布の比較

以上から谷状の形状操作は次のようにまとめられる。

5. 振動に直交方向の谷形状は、凹みと同様の効果である。
6. 振動方向の谷形状は、アーチの足元のときと同様に谷に沿ってエネルギー吸収が分布する。

3.2.5 まとめ

以上から四隅支持のドーム形の基本形状操作と吸収エネルギー分布の関係について得られた知見は次のようにまとめられる。

1. ドーム形の凹み操作には凹み部のエネルギー分布を減少させる効果がある。
2. 1のうち凹みを前後の縁寄りに設けると前後縁部でのエネルギー吸収が大きく減少する。
3. 中央を膨らませる操作は対角を凹ませる操作と同様の吸収エネルギー分布となる。
4. 対角を膨らませる操作は吸収エネルギー分布の幅を変える効果がある。
5. 振動に直交方向の谷形状は、凹みと同様の効果である。
6. 振動方向の谷形状は、アーチの足元のときと同様に谷に沿ってエネルギー吸収が分布する。

3.3 形態操作とエネルギー分布の関係

ここまでは、アーチ形とドーム形のそれぞれについて形状操作によって分類し、順に吸収エネルギー分布を比較検討した。本節では、アーチ形とドーム形について共通する項目を整理する。

3.3.1 凹凸形状

アーチ形ではエネルギー分布発生個所に凹凸を作成すると、吸収エネルギーの分布形が凹凸を避けるように変わる。ドーム形でも凹みを作成すると同様の現象がみられた。この特徴を持つモデルを図3.58に示す。

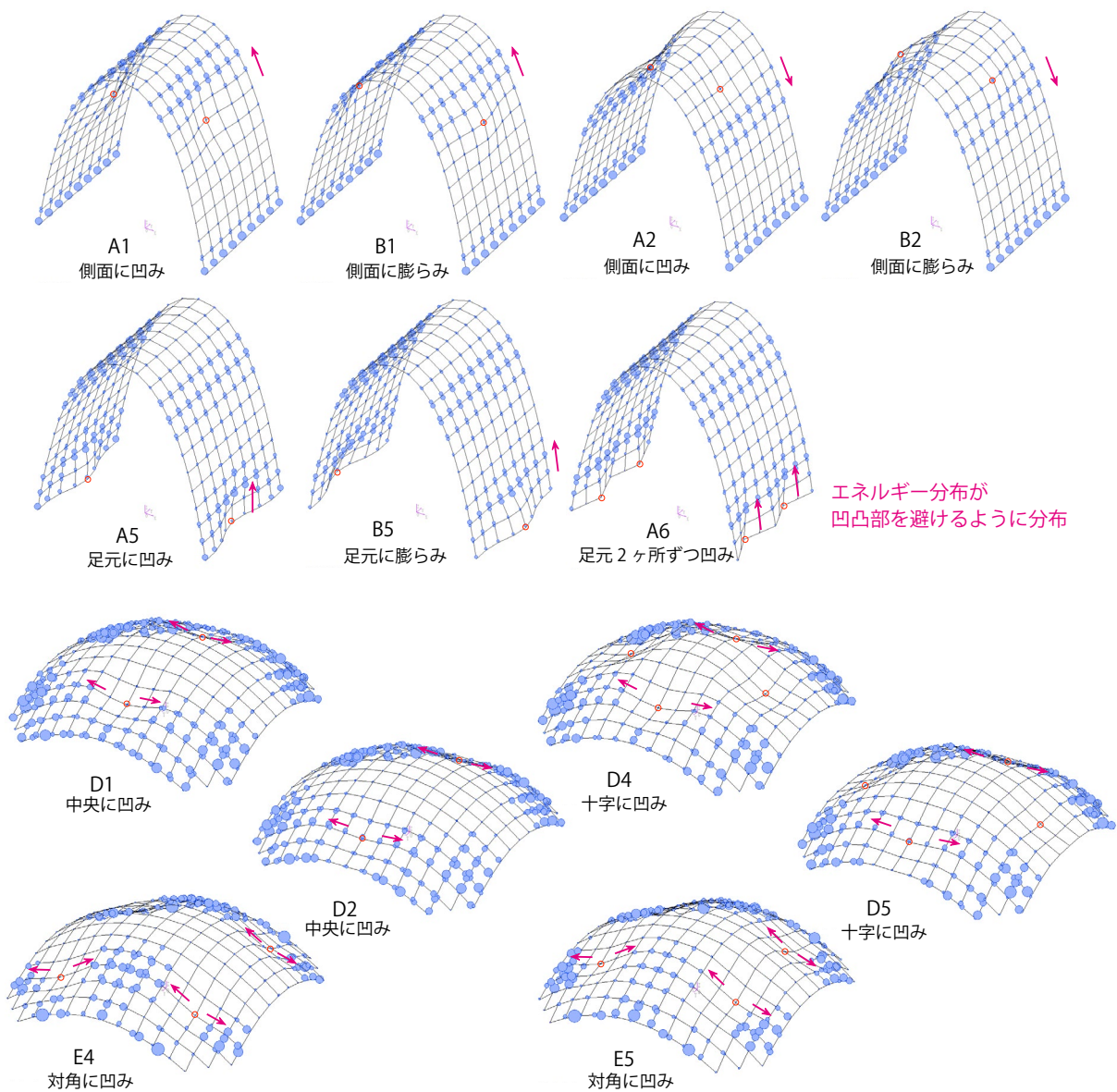


図3.58 凹凸状の形態操作により分布が凹凸部を避けるように移動

形状操作の前後でのエネルギー分布の様子を模式的に表すと図 3.59 のようになる。凹凸部でエネルギー分布が現れなくなり、隣接する凹凸の周囲の領域で分布が発生するようになる。形状操作の前後の分布を見比べると、凹凸によって分布が押し除けられるように見える。

これは凹凸形状によってこの周囲の剛性が局所的に高くなり、応力がそちらへ移動したと考えられる。変形の点からみると凹凸部で曲げ変形が起こりにくくなったために、かわりに凹凸付近に曲げが起こり、その部分にエネルギー分布が発生すると考えられる。

分布の移る方向は分布と凹みの位置関係によって決まる。また、凹凸による効果の範囲も形状によって異なり、アーチ形の肩部では1つの凹みによって広い範囲の分布が変わるが、アーチ形の足元の凹みやドーム形の凹みでは凹凸部で分布が減少するような局所的効果である。また、ドーム形の凸形状は性質が異なる。凹凸形状が及ぼす効果については、モデルや凹凸の配置により違いがあり、モデルごとに検討が必要と考えられる。

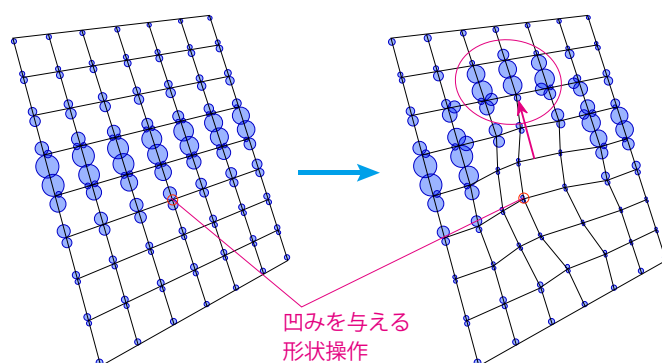


図 3.59 凹凸状の形状操作 模式図

3.3.2 谷形状

谷状の形状操作にもアーチ形とドーム形に共通する特徴がみられる。振動方向と平行に谷状の形状操作を与えると、谷線にエネルギー集中が発生する。これは機構的に谷状部分がV字梁のように働き応力が集中するためと考えられる。図3.60がその分布を示すモデルである。

谷形状の注意点としては、アーチの中腹やドームの振動に平行でない配置では分布が集中するような効果は得られない。これは振動と直角方向ではV字の梁状の効果を得られないためと考えられる。ただし、この場合も形状を窪ませることによる効果はあり、凹みを設ける分類1と同様の分布形となる。

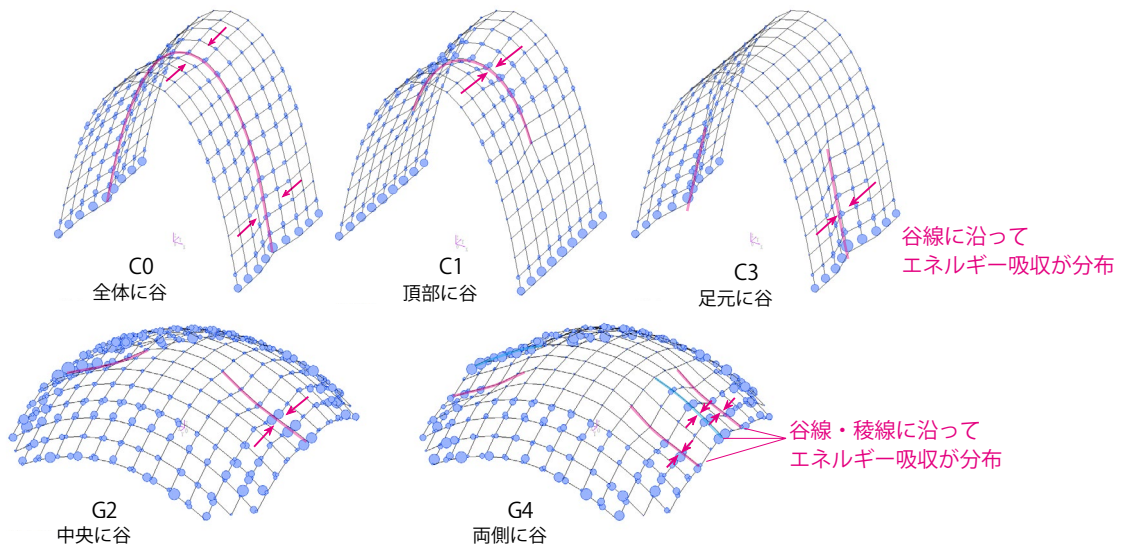


図 3.60 谷状の形状操作により分布が谷線部に集中

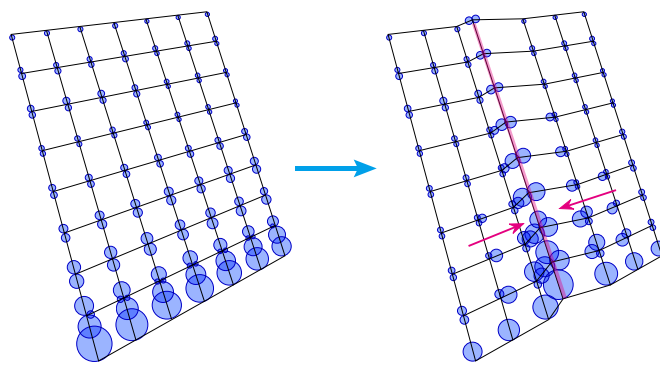


図 3.61 谷状の形状操作 模式図

3.3.3 形状の類似性とエネルギー分布

検討の中では別種の操作によって類似するエネルギー分布となったものがみられた。図 3.62 のように形状に類似性があればエネルギー分布にも類似性があるとみられる。最上段のモデル A1, C1 は形状は異なるものの共に中腹部に窪みを持つ。モデル E1, G3 は前縁部の 2ヶ所を窪ませるという操作が共通しており、F1 は膨らませた中央の両隣が反った形状となっており、結果として E1 と同じ分布が得られると考えられる。E4, F2 も同様に考えられる。一番下の D1, G1 も窪みの形状は異なるが前縁の中央に窪みを作るという操作が共通している。

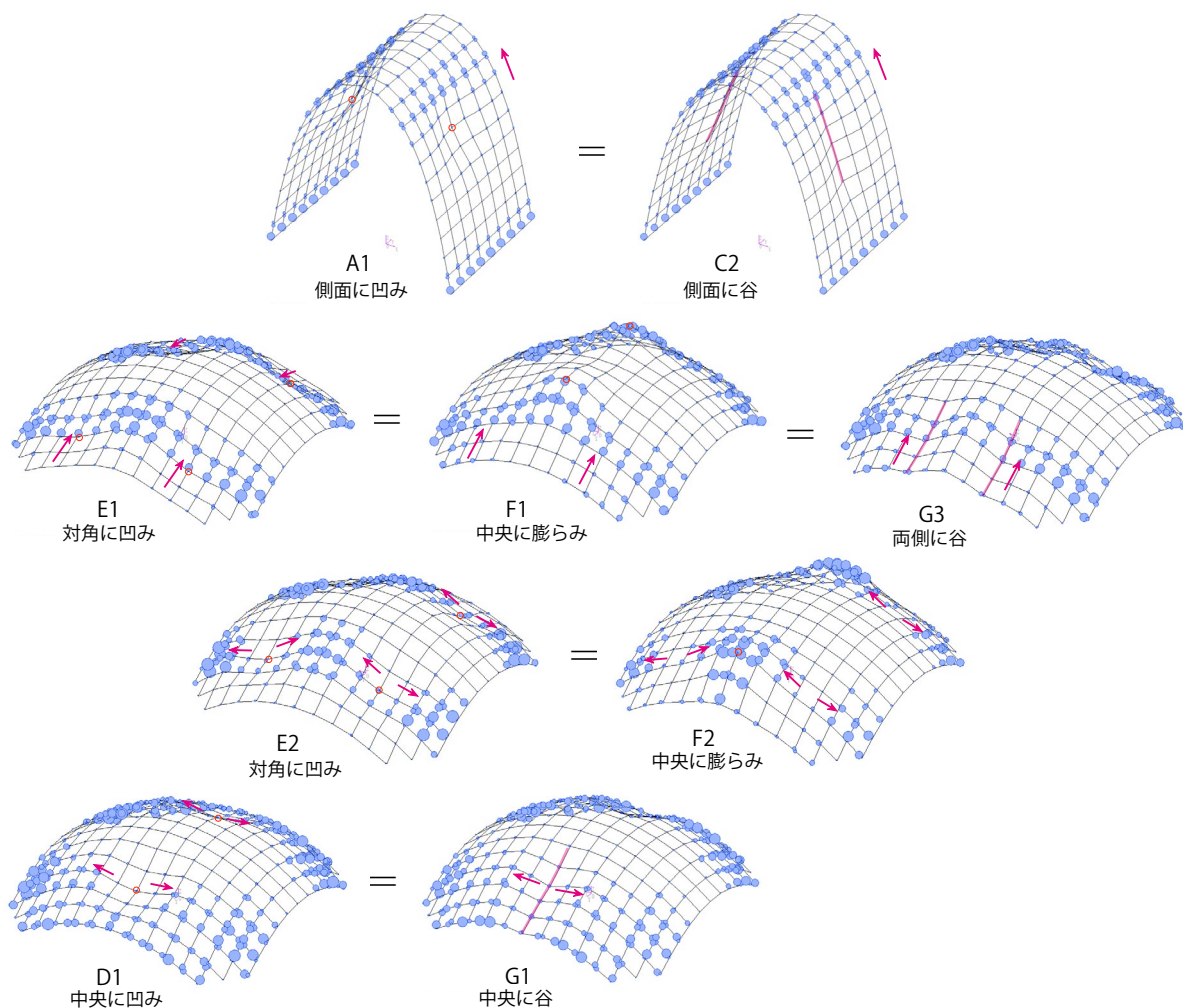


図 3.62 分類 3：異なる形態操作で似た分布が得られる形状

3.3.4 エネルギー分布の性質

アーチ形での検討では複数の形態操作を行う際にエネルギー分布が重ね合わせ状になることが示された。すなわち、2ヶ所の分布について、それぞれに分布を変化させる形態操作があるとする。このとき、その形態操作を同時に行った形状のエネルギー分布は、2ヶ所それぞれが独立にエネルギー分布の変化を受ける。

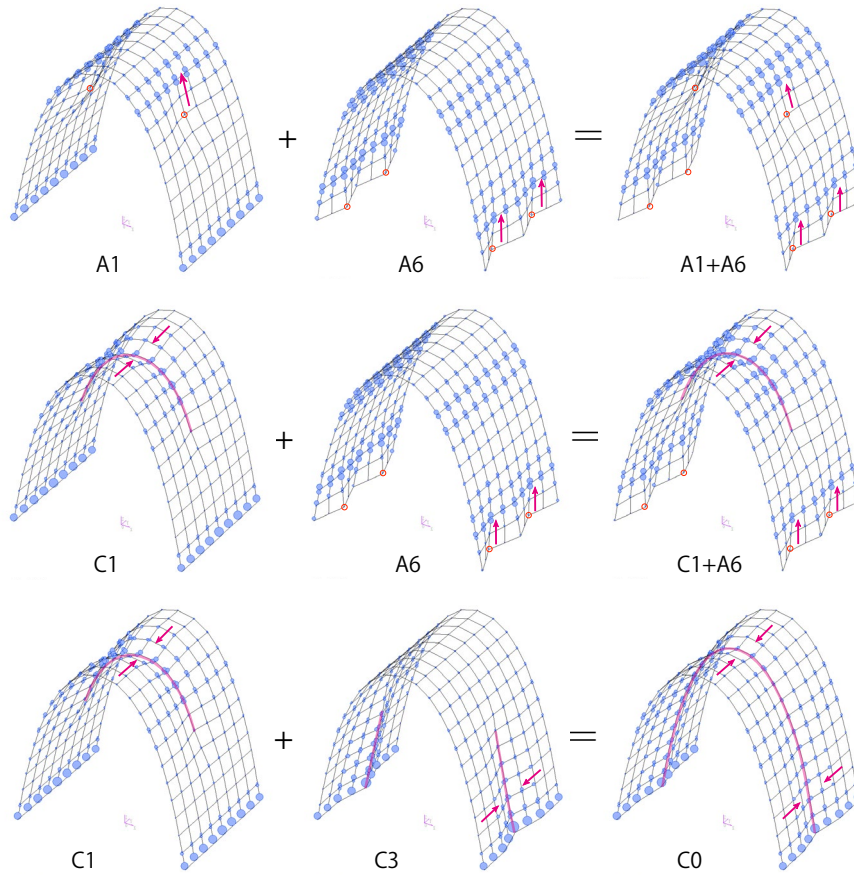


図 3.63 形態操作の独立性

ドーム形の検討において中央前後に凹みを作る D1, D2 や対角に凹みを作る E1 から E5 の分布形で、凹みの中心位置をずらしてゆくと分布の形状も連続的に変化する傾向がみられた。

このことから、類似の形態操作を施した2つのモデルでエネルギー分布が判明しており、その中間形の分布を得たい場合には、その2つの形状操作の中間形を試すことが有効であるといえる。例えば、図3.65でE1とE5の分布が既知である時、その2つの中間形、すなわち分布が中央寄りかつ足元と中央の6ヶ所に分かれるような形状はE2に存在する。

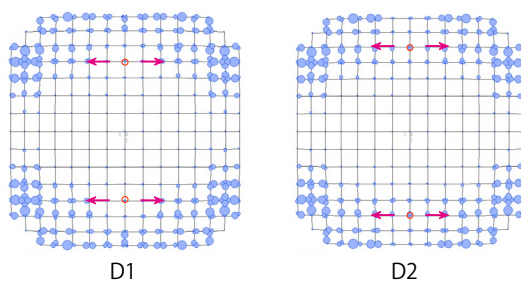


図 3.64 凹みの位置と分布の関係 1

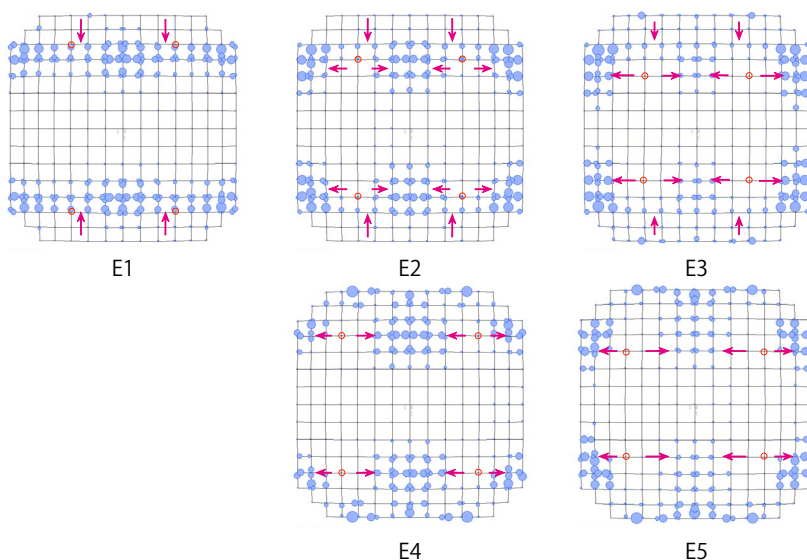


図 3.65 凹みの位置と分布の関係 2

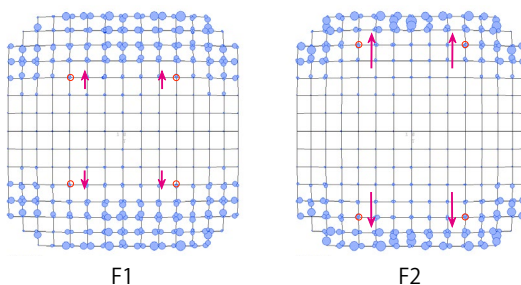


図 3.66 膨らみの位置と分布の関係

3.4 まとめ

3章ではアーチ形と四隅支持のドーム形の初期形状に対し1回の形状操作を行い、基本的な形状操作とエネルギー分布の関係を整理した。その結果、凹凸形と谷形にはそれぞれ特徴的なエネルギー分布の変化が確認された。

- (1) エネルギー分布発生個所に凹凸状の形状操作を行うと、吸収エネルギー分布が凹凸部を避けるように移動する。
- (2) 振動方向と平行に谷状の形態操作を行うと、谷線・稜線に吸収エネルギーの集中が発生する。

(1)にはアーチ形に対する凹凸操作とドーム形に対する凹み操作が該当し、(2)にはアーチ形の頂部と足元への谷状操作およびドーム形の縁部への谷状操作が該当する。

また、異なる形状操作であっても結果的に生成される形状に類似性があれば、細部にやや相違はあるが概ね類似した吸収エネルギー分布が得られる。

さらに、2ヶ所の分布に対し形状操作を同時に行う場合には吸収エネルギーの分布変化が独立に起こることと、連続な形状操作に対しエネルギー分布も連続性を持つことが示唆された。この独立性と連続性は、最適形状を探索するうえで重要となると考えられる。

第4章 最適形状の探索とその手法

本章では、3章において確認した形状操作と吸収エネルギー分布の関係を応用し、形状操作を繰り返して目標とするエネルギー分布を与える形状の探索を行う。この作業を通じて、目標とする分布が得られることを確認し、手法の有用性を示す。

4.1 アーチ形の最適形状

4.1.1 最適形状の探索

ここでは3章で検討を行ったアーチ形モデルについて最終形状を求める作業を行う。表4.1, 図4.1に設計諸元とモデルを再掲する。

表4.1 設計諸元

部材断面	○ - 300 × 12 (mm)
材料	SN400
支持条件	固定支持
自重	0.4 (t/m ²)
1次固有周期	2.0 (s)
基準化	150 (kine)

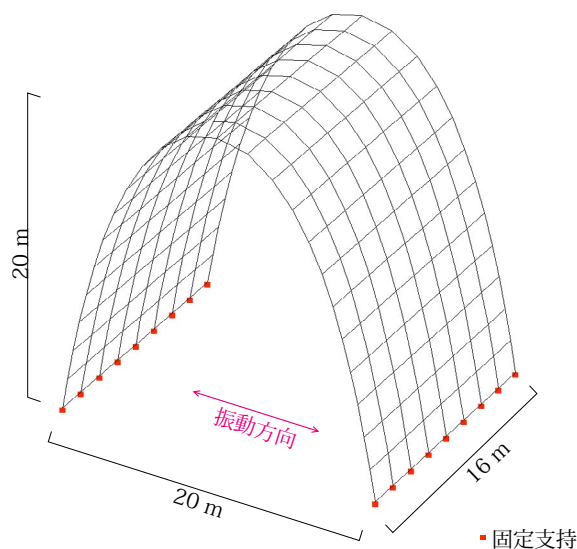


図4.1 初期形状

探索に入る前に目標とする吸収エネルギー分布を設定する。初期状態では図4.2のような分布である。これは4ヶ所に損傷が発生する危険な分布形である。

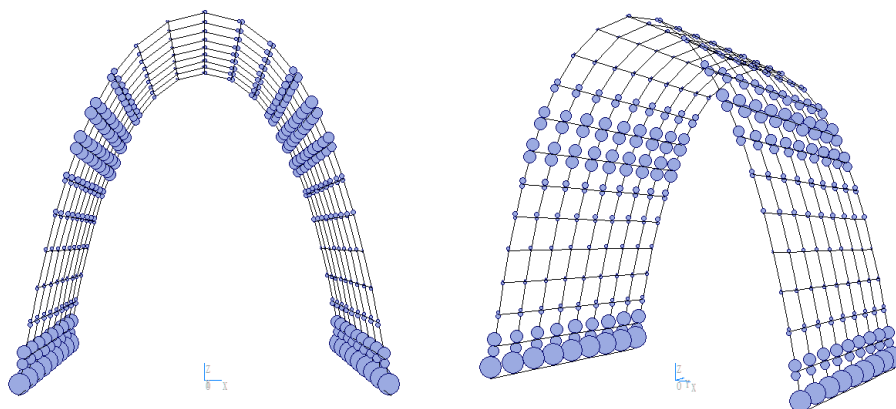


図4.2 初期形状の吸収エネルギー分布

分布形は図4.3のようなものが考えられる。初期状態は(b)のような分布である。第2章でみたように、(a)(b)のような分布は構造的に危険であり、本研究では足元と頂部にエネルギー吸収が集中する(c)のような分布をスリーヒンジ状の分布と呼び、目標に設定する。また、(d)のような足元が強固なスリーヒンジもあり得る。

検討を行うアーチには奥行きがあるので、(e)のように奥行き方向の特定の部分に集中させることも有効である。この場合は4点に分布しているが縁のエネルギー吸収が少なく縁部のアーチが損傷を受けないと考えられるので(b)に比べて安全な分布形といえる。ただし、エネルギー吸収を負担する材が過少の場合、破壊までに吸収できるエネルギーの量が少なくなるため、ある程度帯状に広がった分布が望ましい。なお、ここでは(e)のような分布が実現可能かは不明だが、谷状の形状操作により(e)の足元については実現できると考えられる。また(f)のような奥行で分布が互い違いになれば構造的に安定を保つことが出来る可能性もある。(f)のような分布は奥行きの長いモデルを用意すれば検証できるだろう。

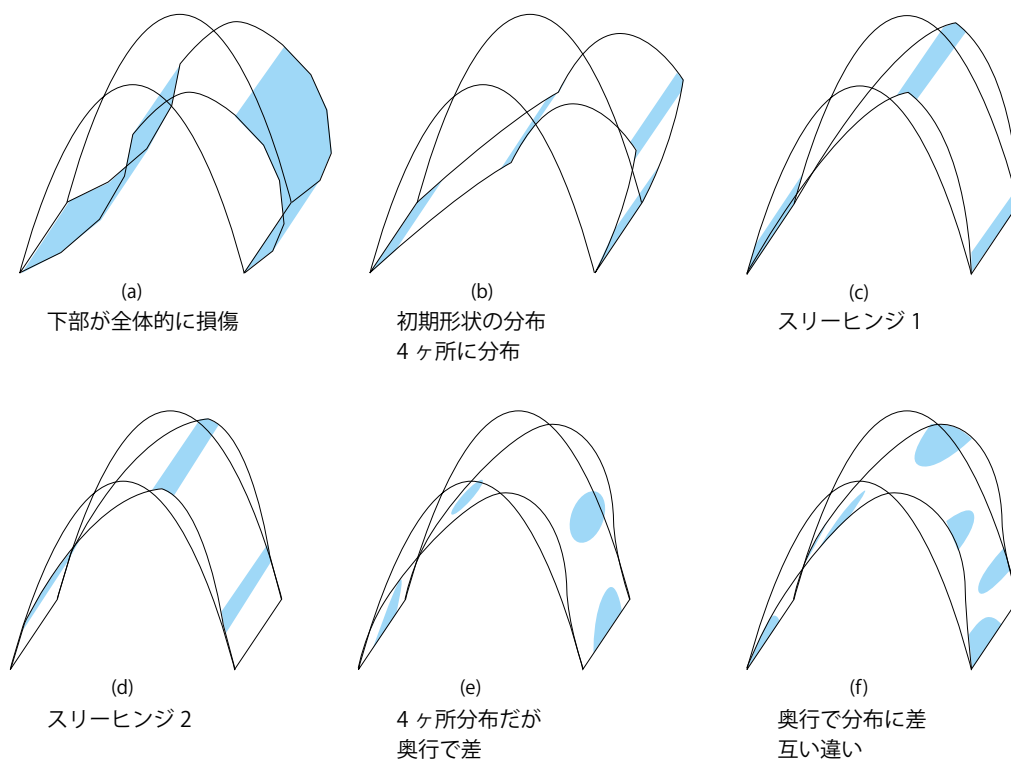


図4.3 アーチ形のエネルギー分布の例

目標とする(c)(d)のような分布を得るためには、肩部のエネルギー分布を頂部もしくは脚部の方へ移動させるという操作が考えられる。そこでまず、肩部に凹みを作る形状操作を行う。

前章で確認したように、アーチ形に対する凹み操作はエネルギー分布を凹部から離れるように移動させる効果がある。また (d) の分布を考えると操作の組合せによって肩部と足元の分布を上方へ移動させる方法が考えられる。これもとに探索を行う。

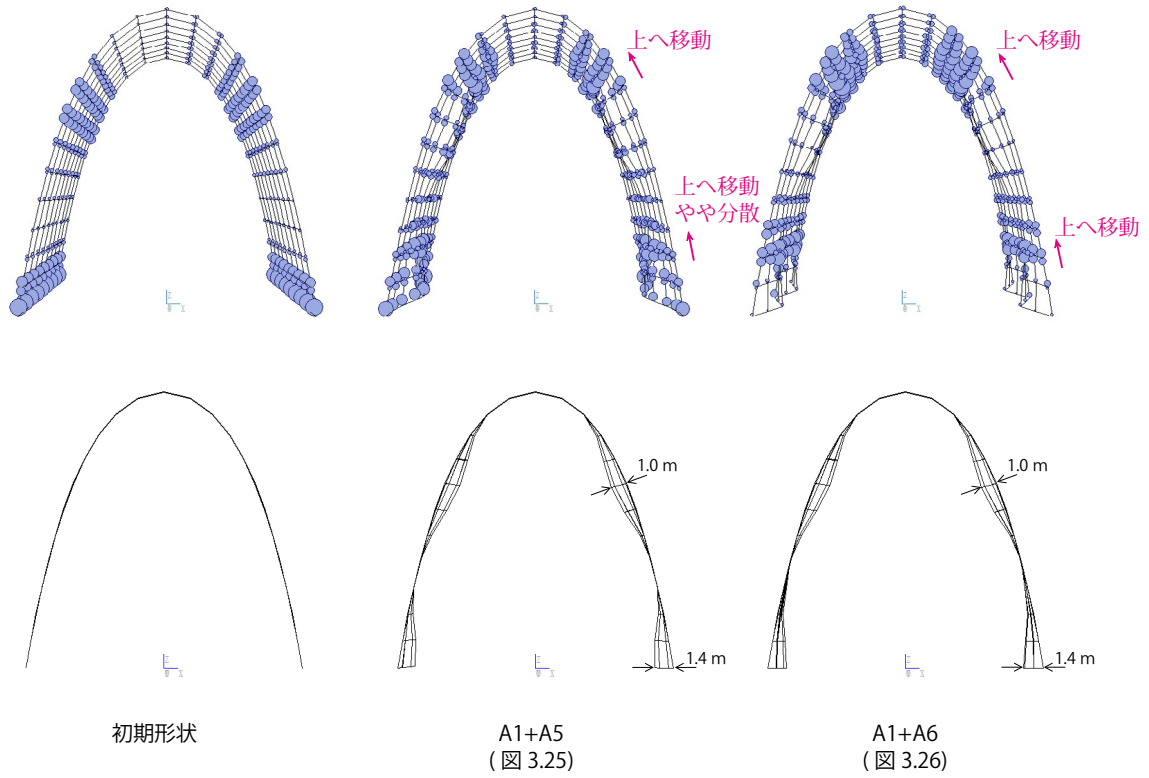


図 4.4 肩部および足元の操作の組合せ

第4章 最適形状の探索とその手法

肩部の分布をさらに上へ移動させることを考える。しかし、肩部の凹みを上方へ大きくするだけでは期待する効果は得られず、次の図 4.5 のようになる。凹みを上に大きくした結果は図の中央のモデルであり、分布は上下に分かれたようになる。これは下寄りの凹みと上寄りの凹みが合わさって、中間の位置に長い凹みを作ったことと形状的に同じとなり、A1 と A2 の中間形のようなエネルギー分布となる。

この凹みの下部に発生したエネルギー分布と足元のエネルギー分布をひとつにまとめることを考える。足元の操作を組み合わせたものが図 4.6 のモデル 703, 726, 730 である。モデル 703 は足元の凹みが 1 つずつであり、730 は凹みを 2 つ持つモデルである。また、726 は足元を膨らませたモデルである。

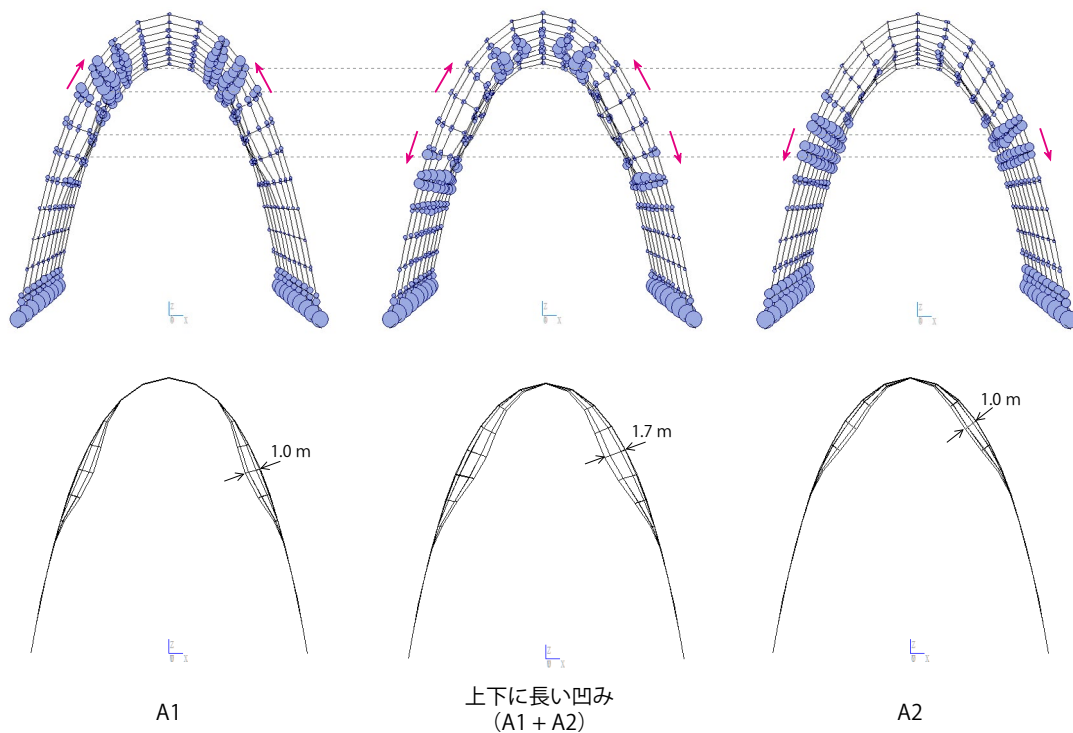


図 4.5 肩部に上下に長い凹みを持つモデル

モデル 703 では足元の凹みが1つだけであり分布がやや分散する形である。モデル 726 はちょうど重ね合わせたように肩部凹みの上下と足元凹みの上に分布が集中する。モデル 730 はやや小さめの変形であるが、凹み下での分布が減少しており求める分布に近づいている。まずはモデル 703 から検討を行う。

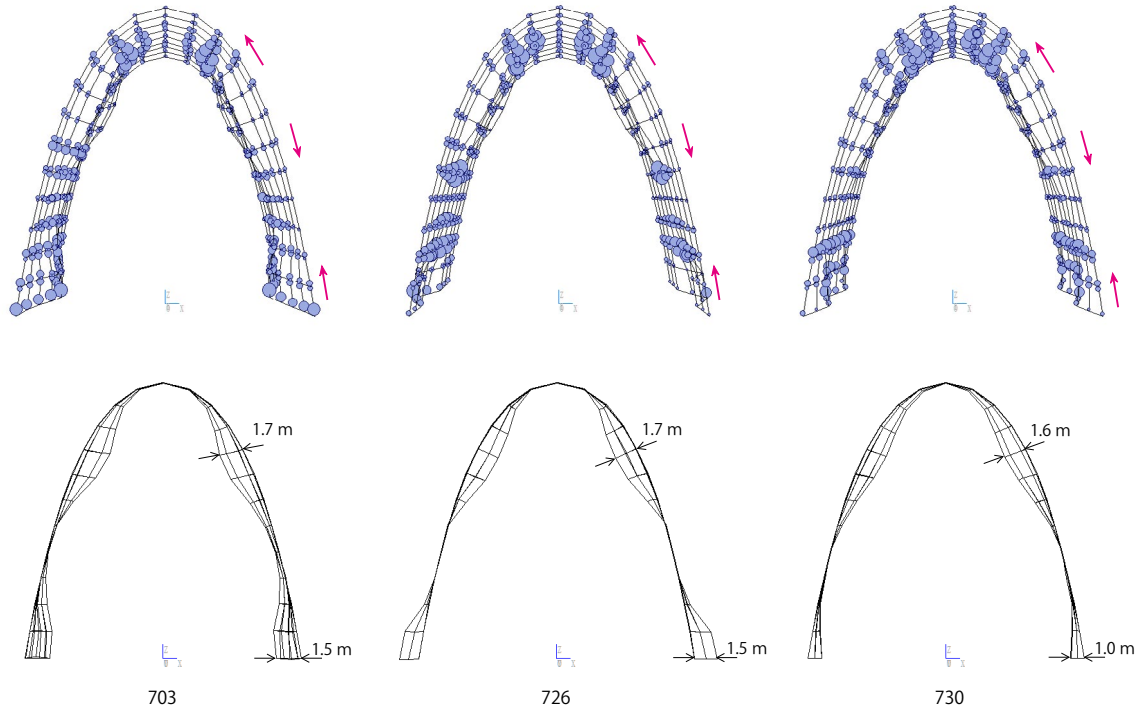


図 4.6 足元の形状による違い

第4章 最適形状の探索とその手法

モデル703の下部の分布を集中させることを考える。アーチ形では703の状態を新しい初期形状と考えると下部に散らばるエネルギー分布を集中させるには、凹みをさらに下方へ追加することが有効と考えられる。この結果は図4.7のようになる。分布は下へと移動し、図4.7モデル709のようになる。肩部の凹み部にはエネルギー分布が発生しなくなるが、足元の凹部は大きさ、深さを変えても依然としてエネルギー分布が残る。

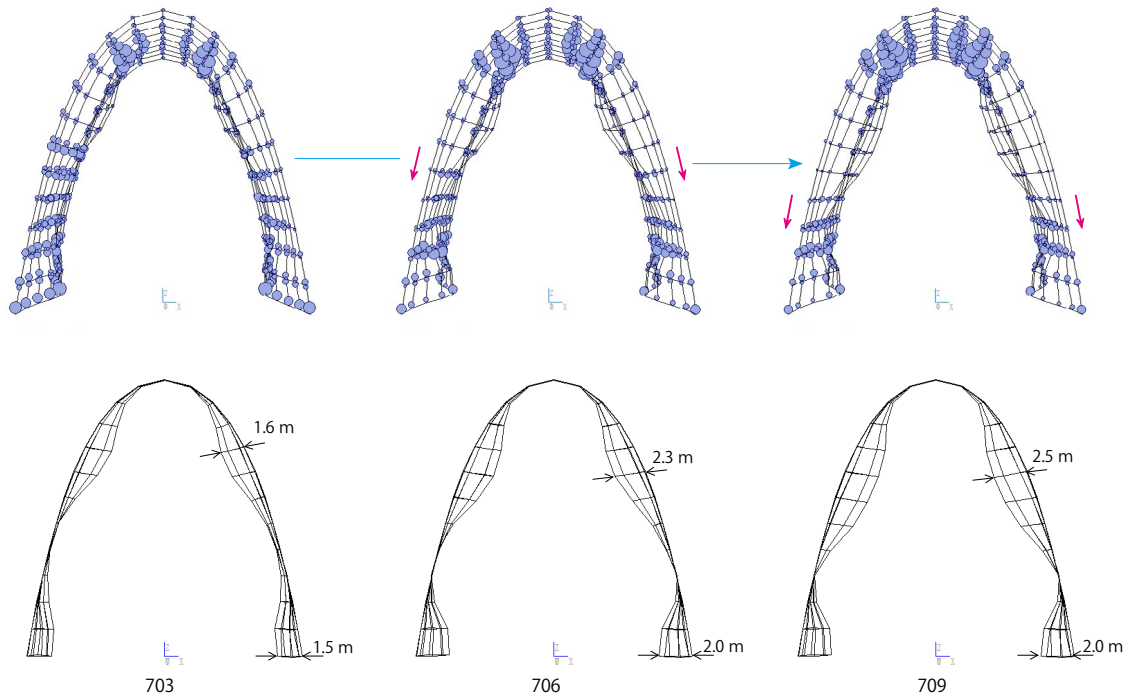


図4.7 肩部凹みの下方への拡大

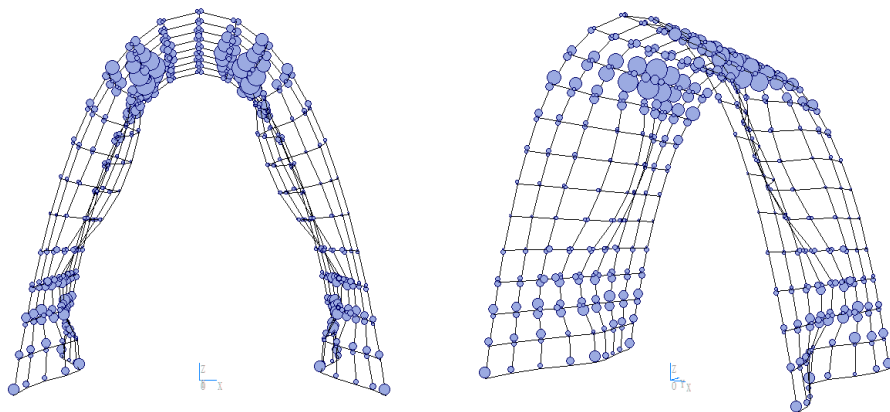


図4.8 モデル709

モデル 730 について肩部と足元の凹みの深さを大きくすると、ややばらけていた分布がより集中した分布へと変わる。分布の発生位置は変わらず、凹みの深さは分布をより集中させる効果がある。結果、モデル 731 は肩部の凹部分と足元の吸収エネルギーはほとんど見られなくなる。

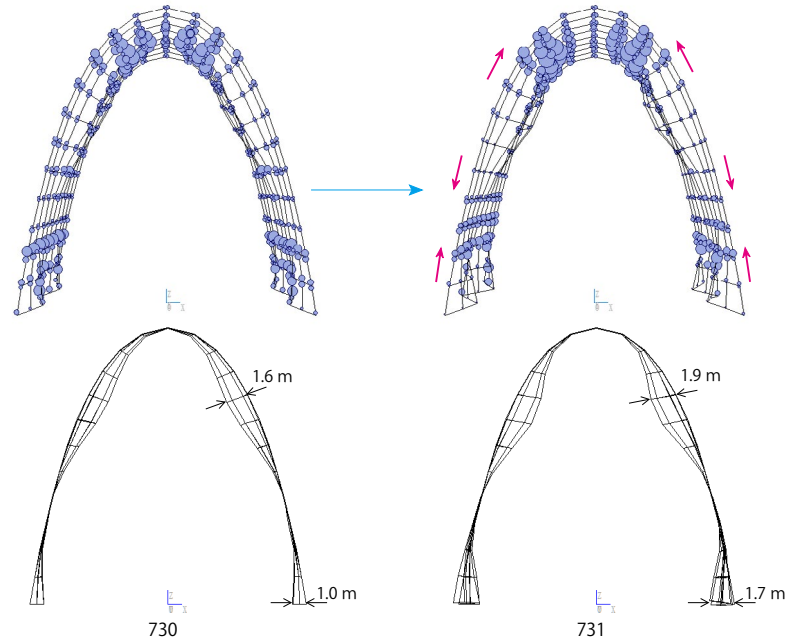


図 4.9 凹みを拡大し下部のエネルギー分布を統合する

モデル 726 については足元の膨らみも上方向へ拡大したところ、図 4.10 のモデル 732 のように足元への集中形に変化した。これは 3 章では確認されなかった現象であるが、上下で凹みと膨らみを組み合わせたことに起因すると考えられる。

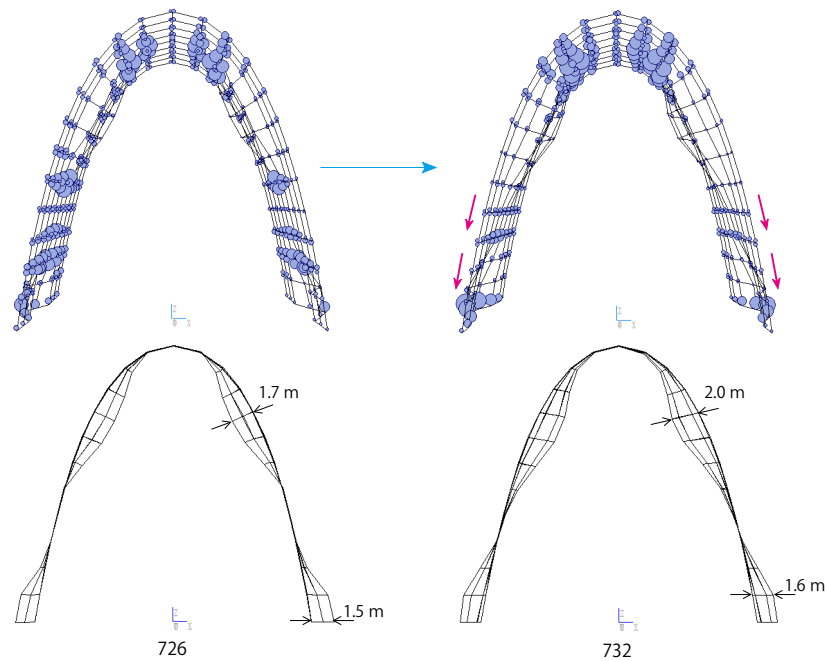


図 4.10 肩部凹みと足元膨らみの組合せ

第4章 最適形状の探索とその手法

上下の凹凸をさらに一体化させるとモデル742のように足元の凸部は谷形状のように稜線に分布が集中することが確認される。また、モデル742は上部の凹みをさらに拡大させたことにより、上部のエネルギー分布は頂点に集まっている。

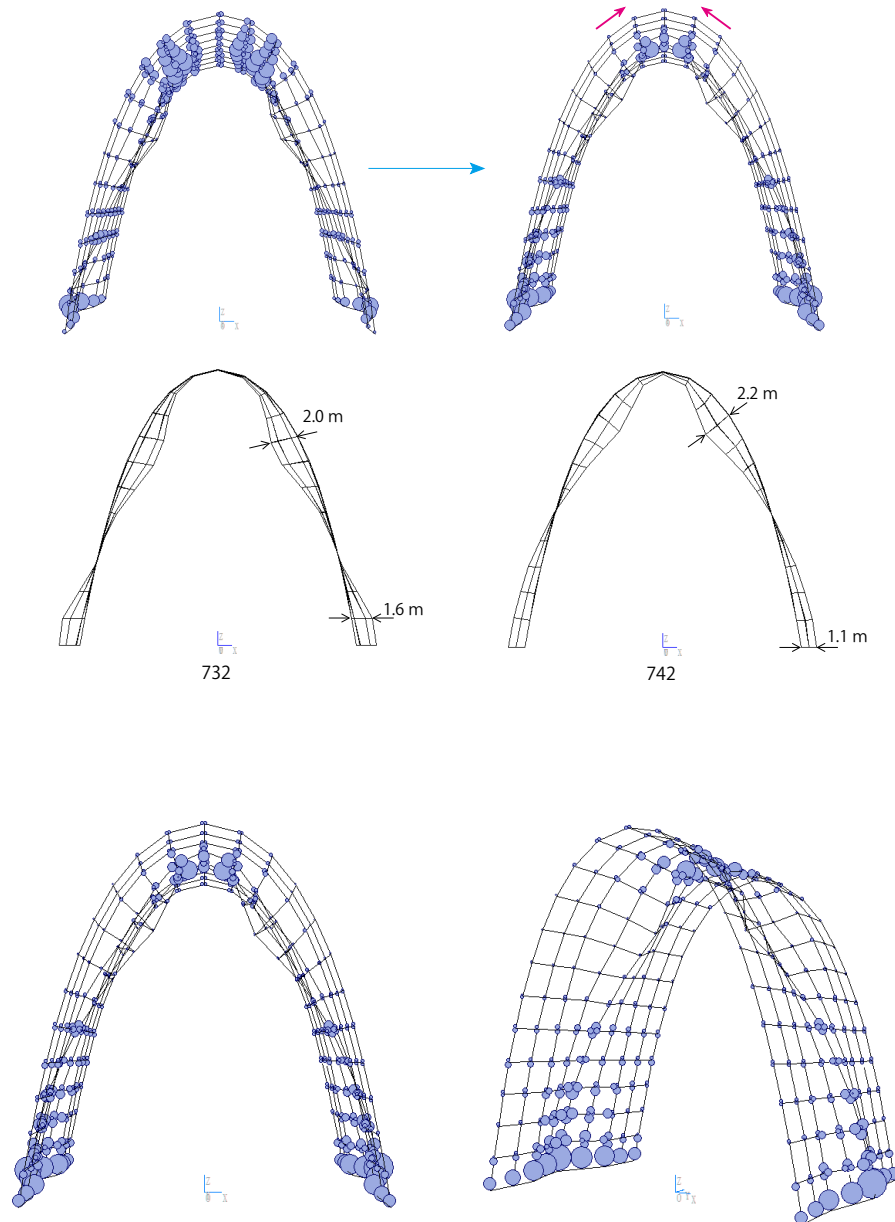


図4.11 モデル742

モデル 742 の頂部の形状を参考にモデル 734 に同様の操作を行って得られるモデルが 746 である。エネルギー分布の重ね合わせにより上部は頂点に集中し、足元の分布は上へ移動した図 4.12 のような分布が得られる。

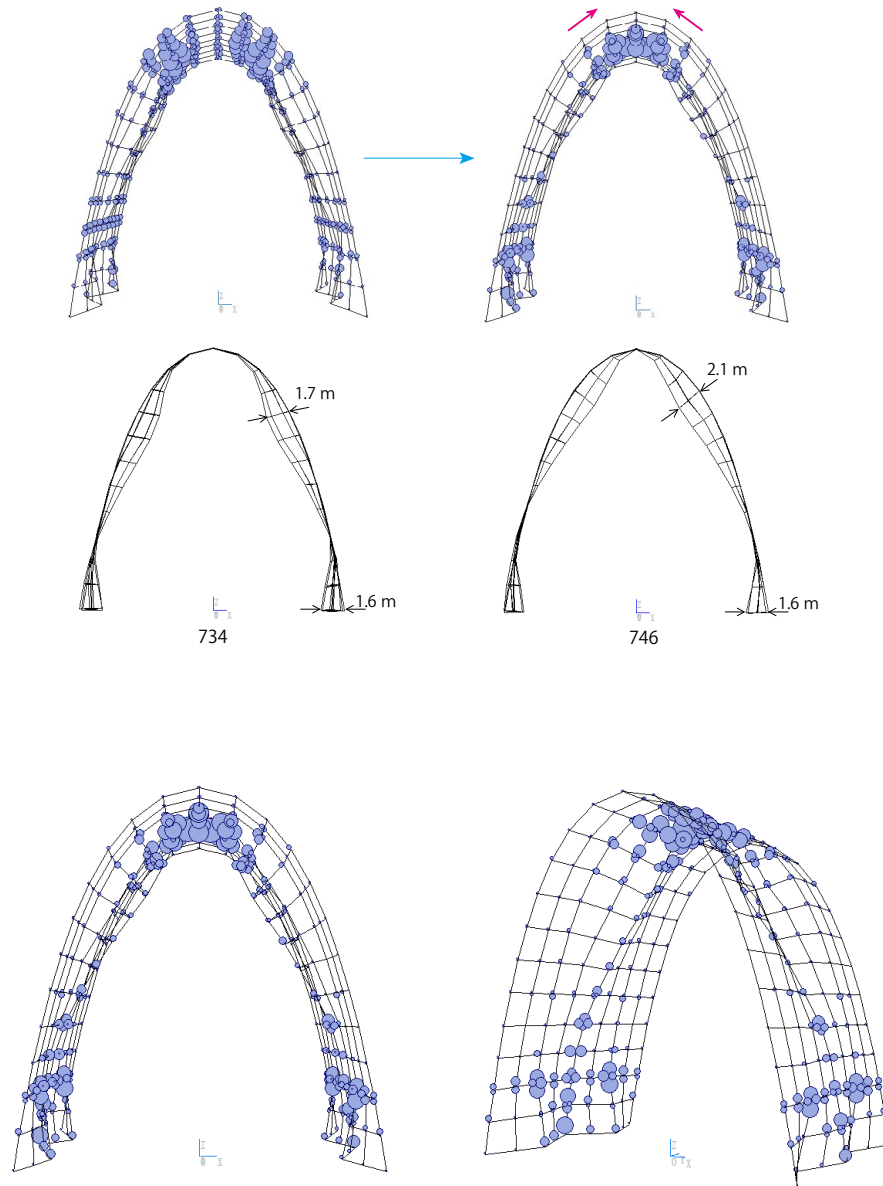


図 4.12 モデル 746

本検討では分布を上へ寄せてから頂点に集めたが、先に上寄りに凹みを作成したのち、凹みを拡大して分布を下へと押し下げても途中から頂部にエネルギー吸収が発生し最終的には同様の分布となる。

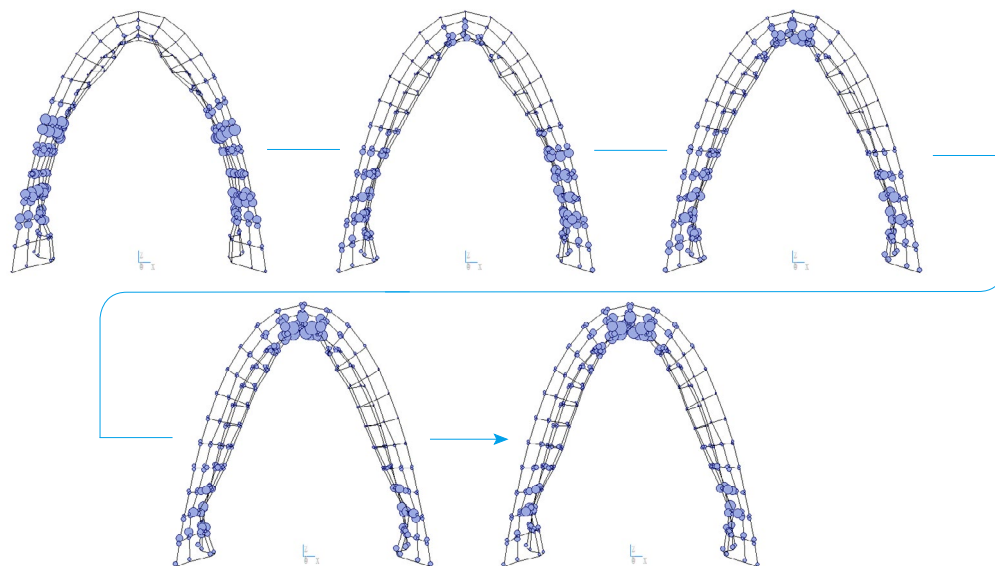


図 4.13 頂部のエネルギー分布の発生

モデル 742 およびモデル 746 において分布が 3 ヶ所に集中したと判断し、探索を終了する。

アーチ形の形状操作の過程を系統図にまとめると図 4.14 のようになる。エネルギー分布は全体的に連続的に変化し、肩部の凹みを下へ拡大するほど上下へと別れていく。形状操作を組み合わせることで連続的に分布を変化させることが出来るといえる。

また、モデル 734 と 742 ではそれぞれの下部と上部を組合わせたことを表しており、これにより双方の特徴を持つ新しい系統が作成される。これは遺伝的アルゴリズムの交叉のようなものである。

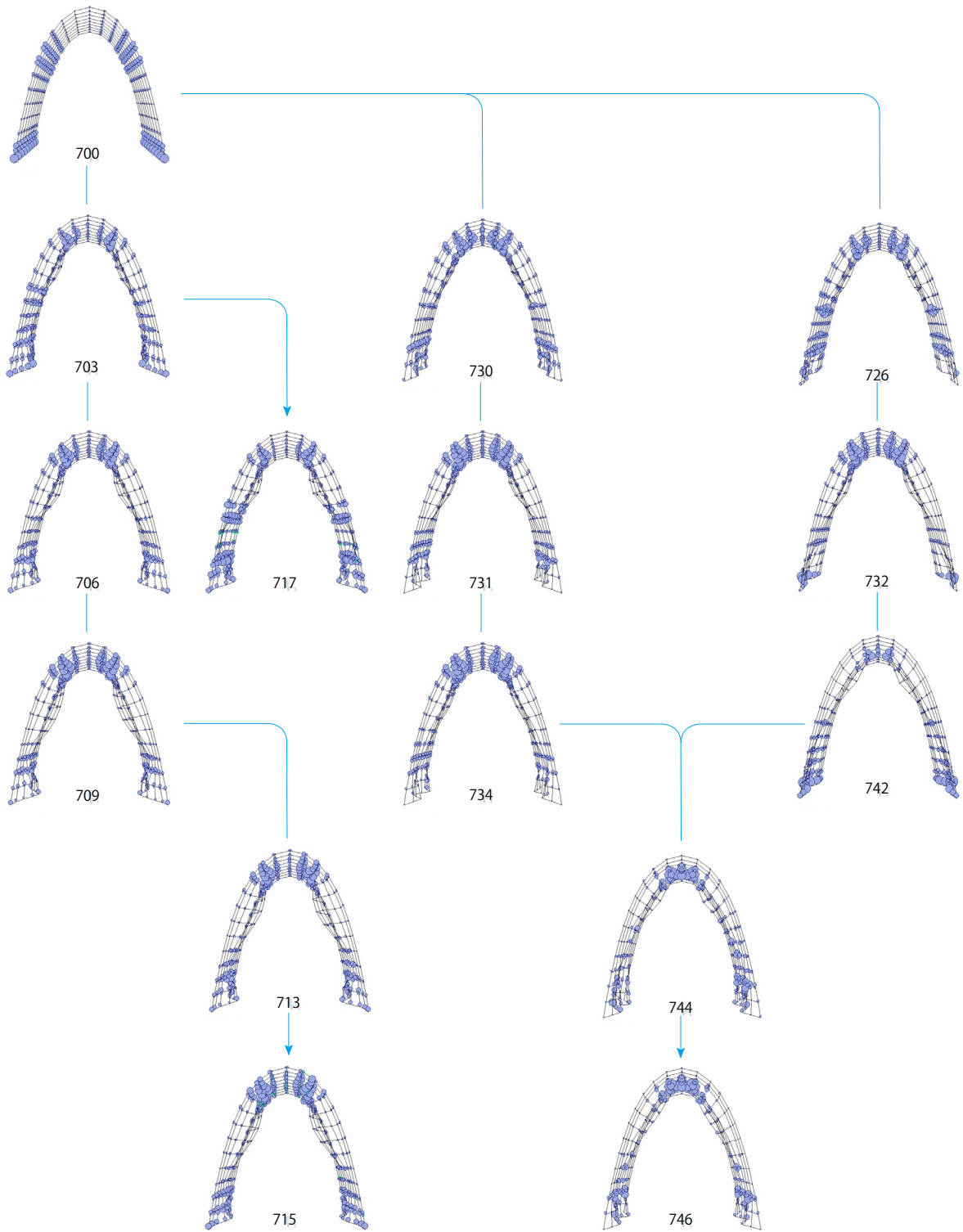


図 4.14 アーチ形の形態最適化

4.1.2 形状の異なるアーチ形の検討

同様の形態操作が、異なる形状のアーチにも適用できることを確認する。ここでは一例としてモデル742の形状を検討する。一つ目は楕円形のアーチに、もう一つは低ライズのカテナリーアーチに形状操作を行ったものである。

楕円形アーチはスパン20 m、高さ20 m、奥行10 mの格子状骨組みで、設計諸元は表4.2、初期形状は図4.15である。このとき初期状態での吸収エネルギー分布は図4.16のとおりである。

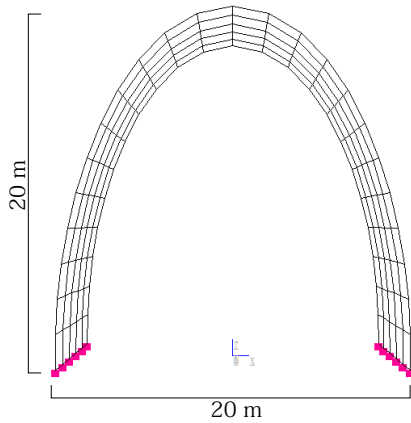


図4.15 初期形状

表4.2 設計諸元

部材断面	○ - 300 × 12 (mm)
材料	SN400
支持条件	固定支持
自重	0.4 (t/m ²)
1次固有周期	2.0 (s)
基準化	150 (kine)

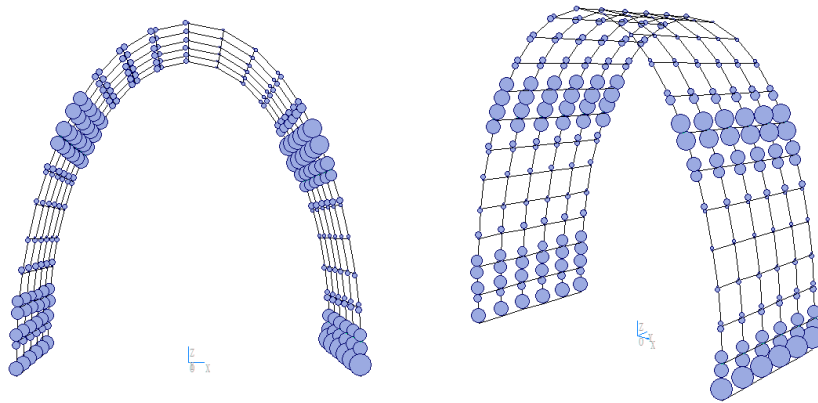


図4.16 楕円形アーチ 初期形状のエネルギー分布

カテナリー形のアーチと同様の形状操作を施すことで図 4.17 に示すように同様に肩部のエネルギー分布を頂部と足元へ移し、モデル 742 と同様の分布が得られる。最終形状は下の図 4.18 のようになる。

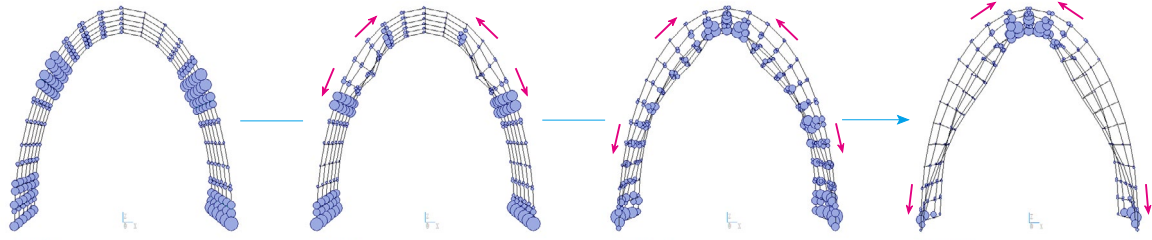


図 4.17 楕円形アーチの最適化

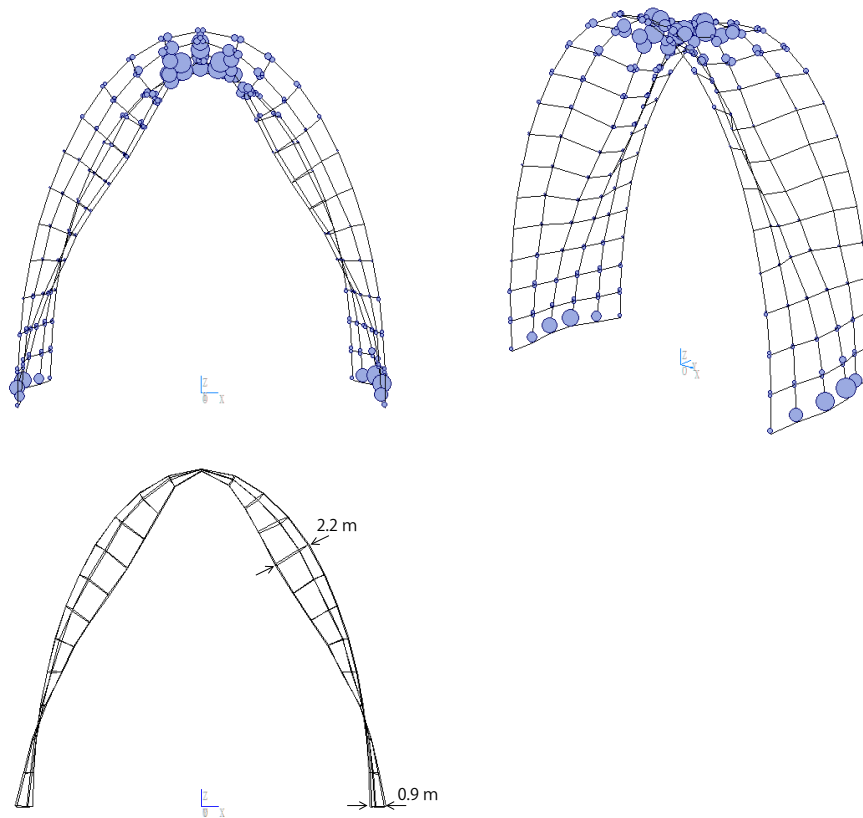


図 4.18 楕円形アーチ 最終形状のエネルギー分布

第4章 最適形状の探索とその手法

次の形状はスパン 30 m、高さ 15 m、奥行 10 m のカタナリー形アーチである。設計諸元は表 4.3、初期形状は図 4.19 であり、このときの吸収エネルギー分布は図 4.20 に示す。

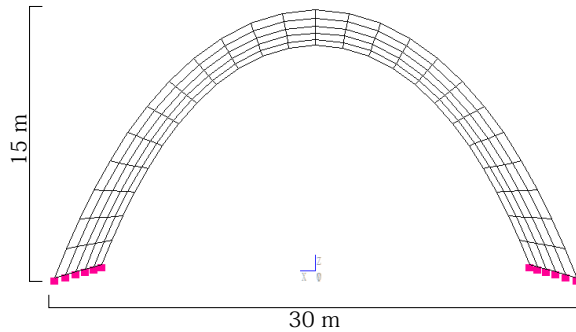


図 4.19 初期形状

表 4.3 設計諸元

部材断面	○ - 300 × 12 (mm)
材料	SN400
支持条件	固定支持
自重	0.4 (t/m ²)
1 次固有周期	2.0 (s)
基準化	150 (kine)

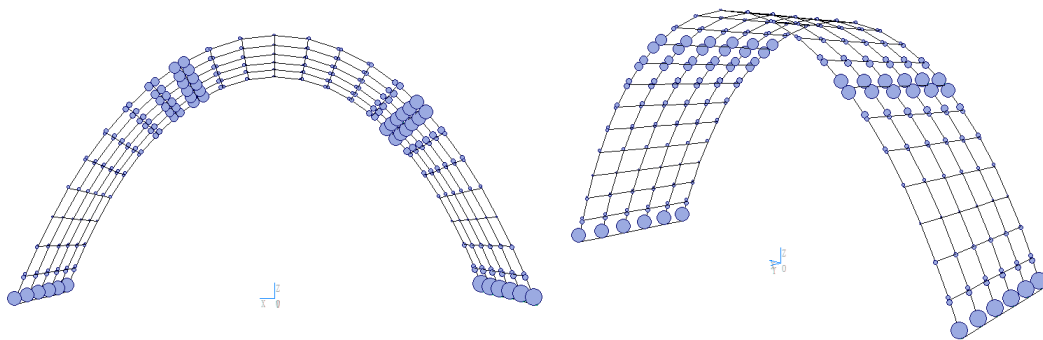


図 4.20 低ライズアーチ 初期形状のエネルギー分布

図 4.21 のように低ライズアーチでも同様の操作によって頂部と脚部の 3ヶ所に分布するような形状が得られることが確認できる。最終形状を図 4.22 に示す。

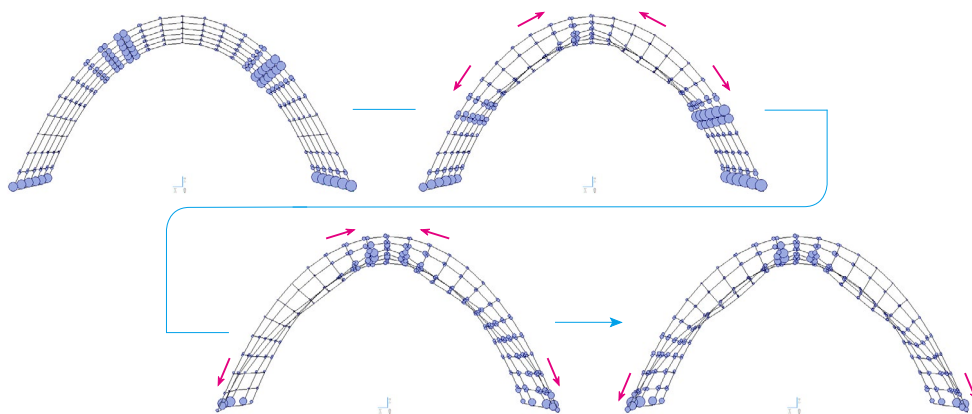


図 4.21 低ライズアーチの最適化

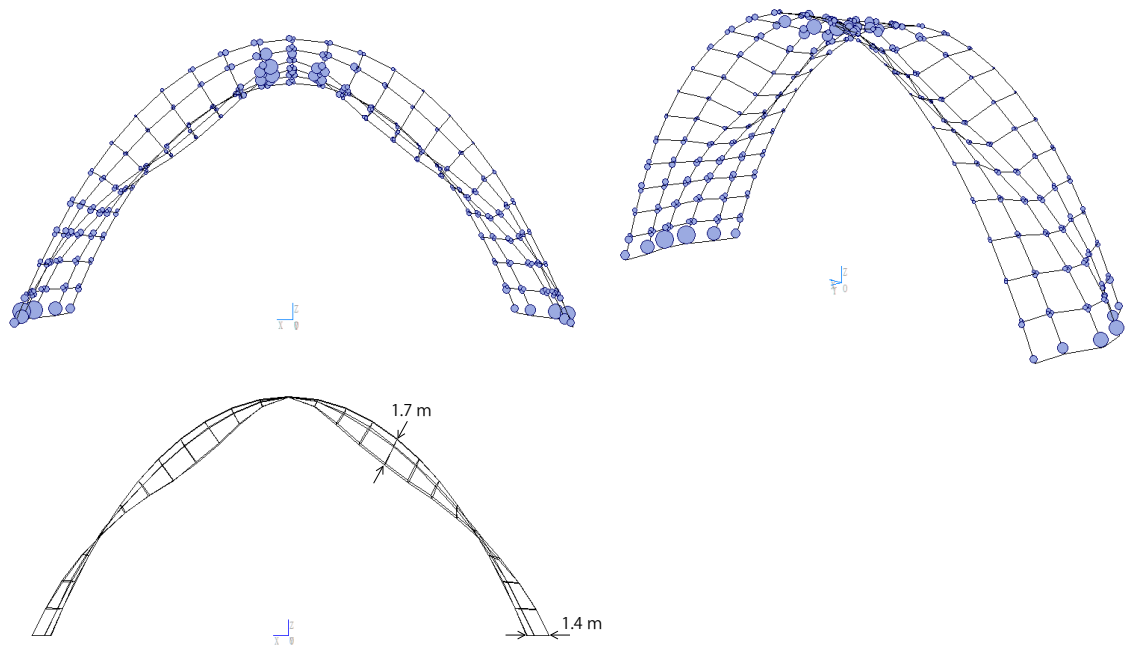


図4.22 低ライズアーチ 最終形状のエネルギー分布

以上により、同様の手法が異なる形状やライズのアーチにも適用できることがわかる。形状操作の特性は、初期形状の曲線の形状やライズにかかわらず応用ができると考えられる。

4.2 ドーム形の最適形状

4.2.1 最適形状の探索

3章で検討を行ったドーム形モデルについても最終形状を求める作業を行う。表4.4, 図4.23に設計諸元とモデルを再掲する。

表4.4 設計諸元

部材断面	○ - 250 × 6 (mm)
材料	SN400
支持条件	ピン支持
自重	0.4 (t/m ²)
1次固有周期	1.2 (s)
基準化	75 (kine)

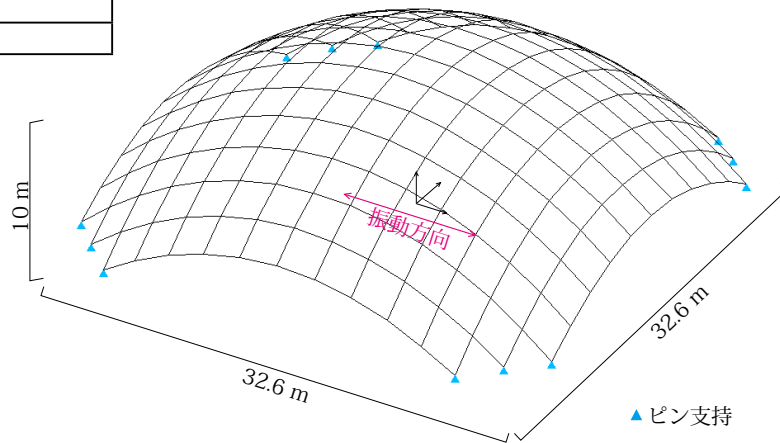


図4.23 初期形状

初期形状での吸収エネルギー分布は図4.24のとおりである。これは振動に対してドームの中央部を支えている縁部が全体的に塑性化しており、危険な分布と判断される。

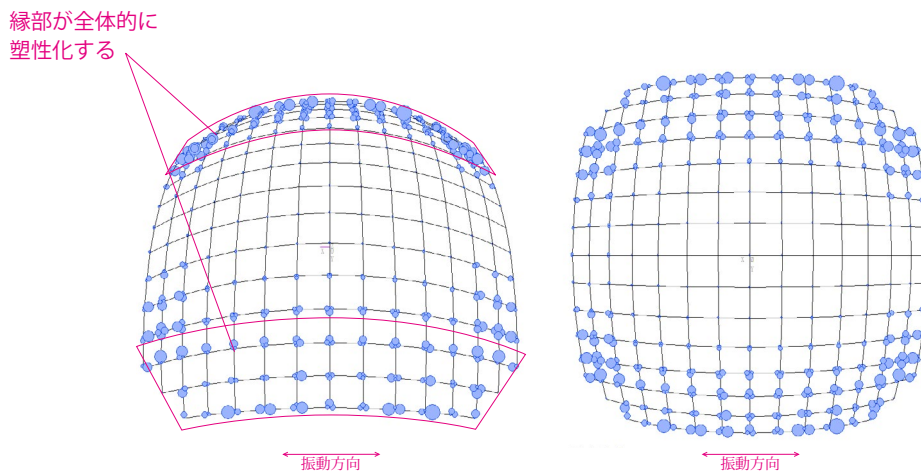


図4.24 ドーム形の初期形状の吸収エネルギー分布

4 隅支持のドーム形についてエネルギー分布を考える。初期形状は図 4.25 の (a) のような分布であり、振動に対してエッジのアーチ部が効かなくなっていると考えられる。脚部が塑性化する (b) のような分布も危険な分布である。(b) や (c) のような分布は振動方向に対しスリーヒンジ状といえる。(e) のような分布はより安全であると考えられる。また、(f)(e) のように分布が機構に影響しない分布も安全と考えられる。

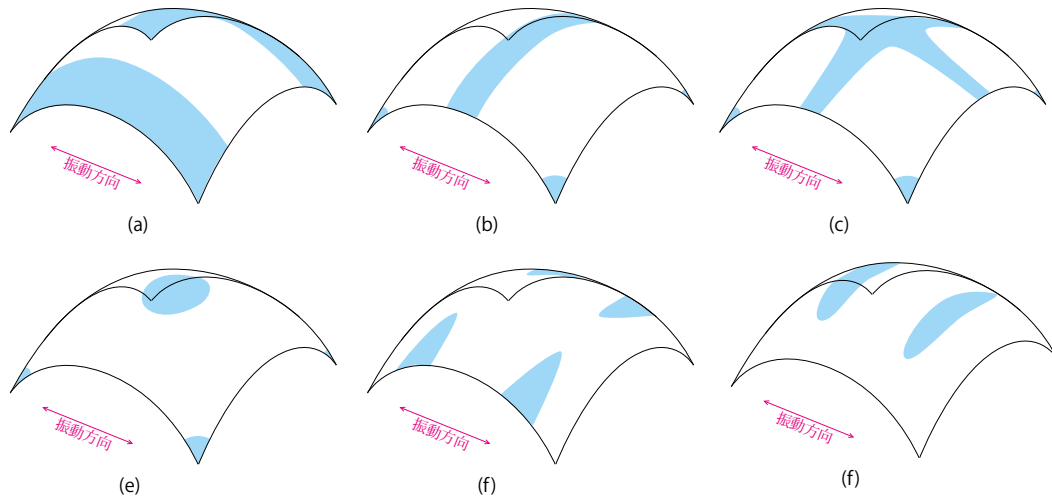


図 4.25 四隅支持のドーム形のエネルギー分布の例

3 章より、ドーム形状においても凹形の形状操作によって吸収エネルギー分布が凹部から離れるように変わる。そこでまずは振動方向ドーム縁部に帯状に分布する吸収エネルギー分布を、(b) のような中央と足元 4 点まで移動させることを目指す。3.2.4 項において確認したように対角に凹ませると中央と両端に集まる。3.2.5 項より、ドームの中心線上を膨らませる操作も同様の効果であるため、この凹凸操作を組み合わせることでエネルギー分布を目標へと近づける。

第4章 最適形状の探索とその手法

対角の位置4ヶ所を凹ませてこの部分の分布を減少させ、足元と中心部に残るように形状操作を加えていく。分布は連続的な形態操作に対して連続に変化する傾向があるので、いくつかの形状操作を試み、求める結果に近いものを選びながら進めていく。形状の変化は図4.26のようになる。モデル620において振動方向(図の左右方向)に対しておおよそ足元と前後方向の3カ所に分布している。

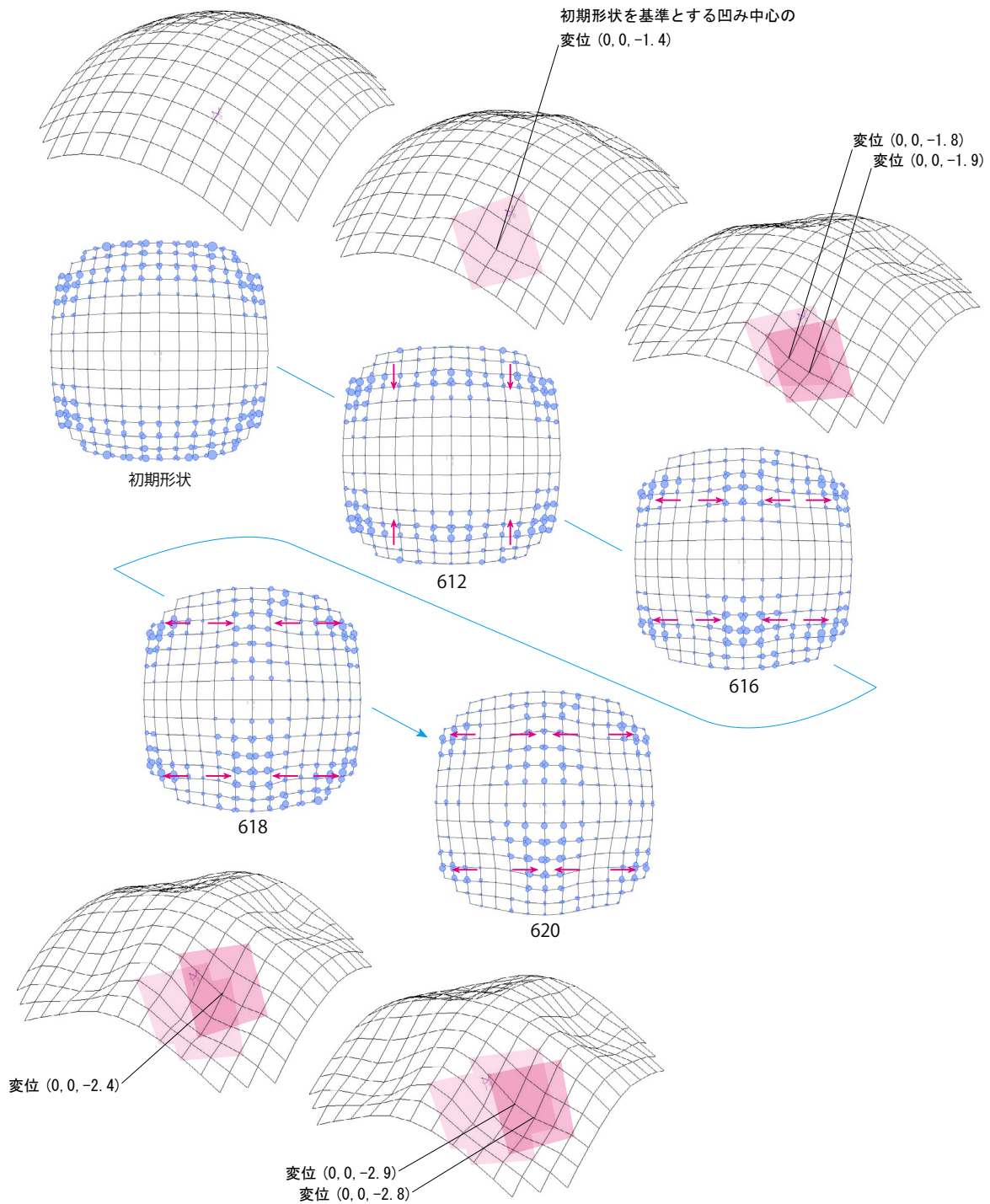
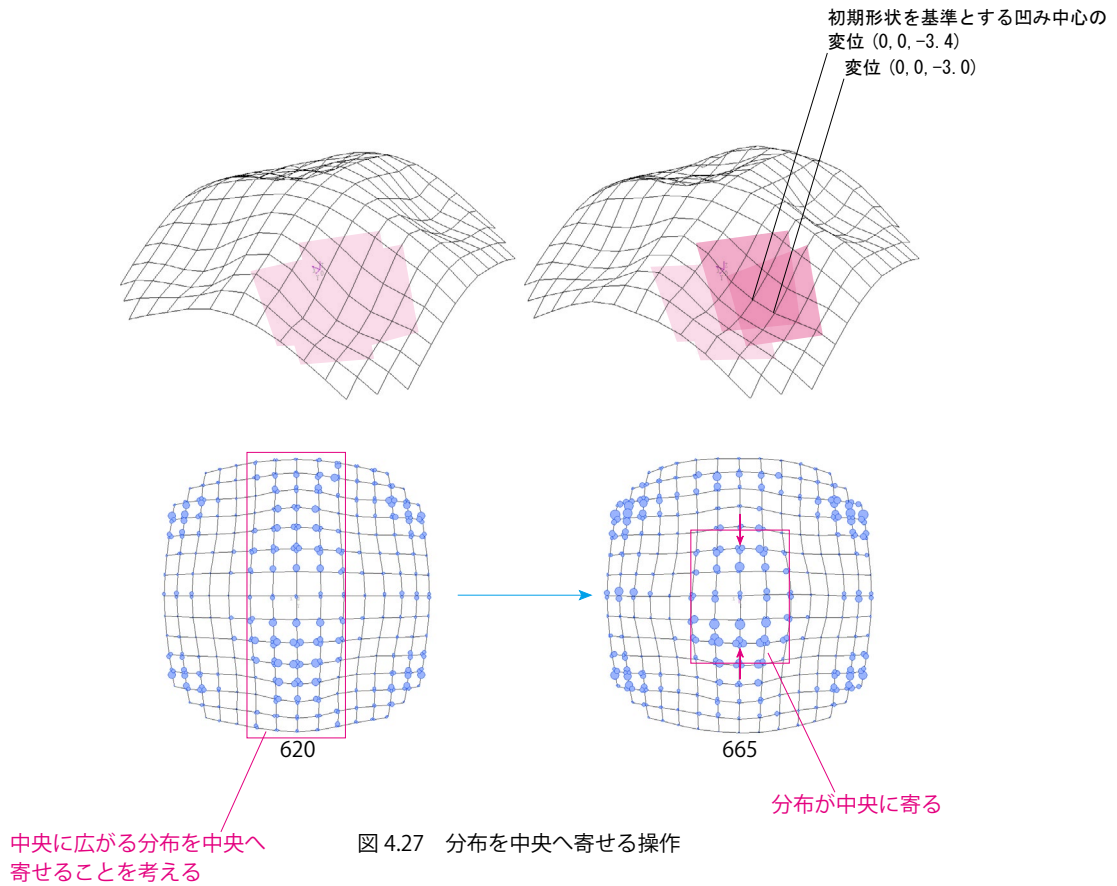


図4.26 対角を凹ませる操作の繰り返しによる形状

ここではさらに中央前後方向の分布を中央に寄せるという (e) の分布を目標とする操作を考察する。中央に広がる分布を頂点へ集めることを考える。

モデル 616 からモデル 620 のように凹みを中央へ広げることによりエネルギー分布が頂点に向かって広がる傾向が観察されるため、さらに凹みを中央へ広げる。この操作により図 4.27 のような分布が得られる。



対角を凹ませる操作を繰り返すと左右のエッジの中央部に分布が発生してくる。この分布を減少させるにはこの部分をやや下げることが有効であった。図4.28のように、高さを下げた部分は凹みを形成するには至らないが、分布を減少させる効果は得られた。

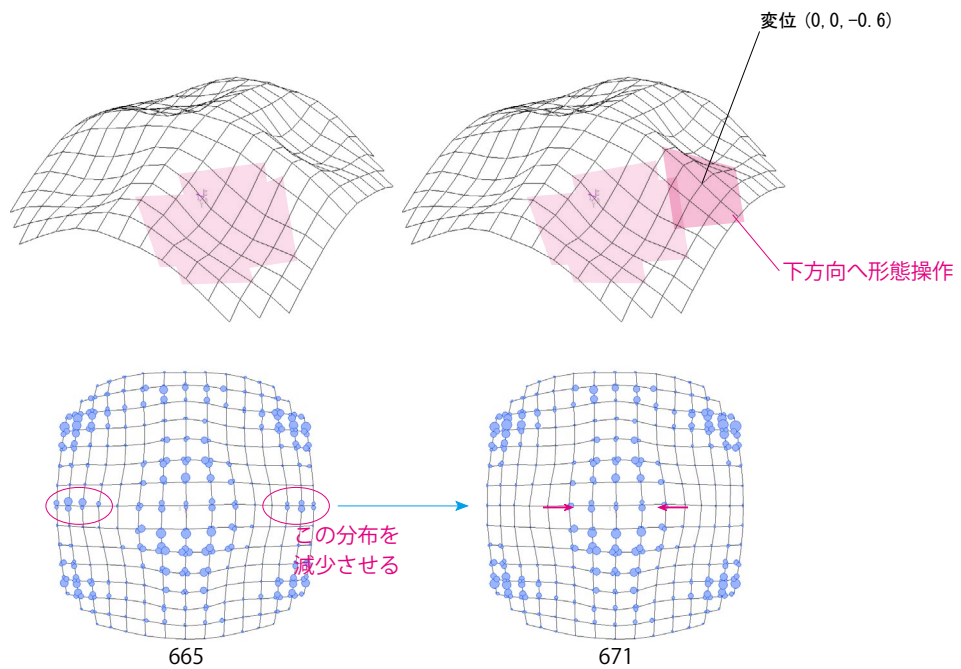


図4.28 左右エッジ部に発生した分布を形態操作により減少させる

前頁の操作後、前後の中央部を膨らませる操作を行う。第 3 章の基本操作の検討における 3.2.3 項でみたように、エッジ部の中央を上へ膨らませる形状操作することにより分布が内側へ移動する効果が得られる。この結果、エッジ部に残っていたエネルギー分布も中央へ集まり、モデル 684 のような中央と足元の 5ヶ所に集まった分布をあたえる形状が生成される。モデル 684 にてエネルギー分布はおおよそ中央部と足元部に集まったとみなし、操作を終了する。

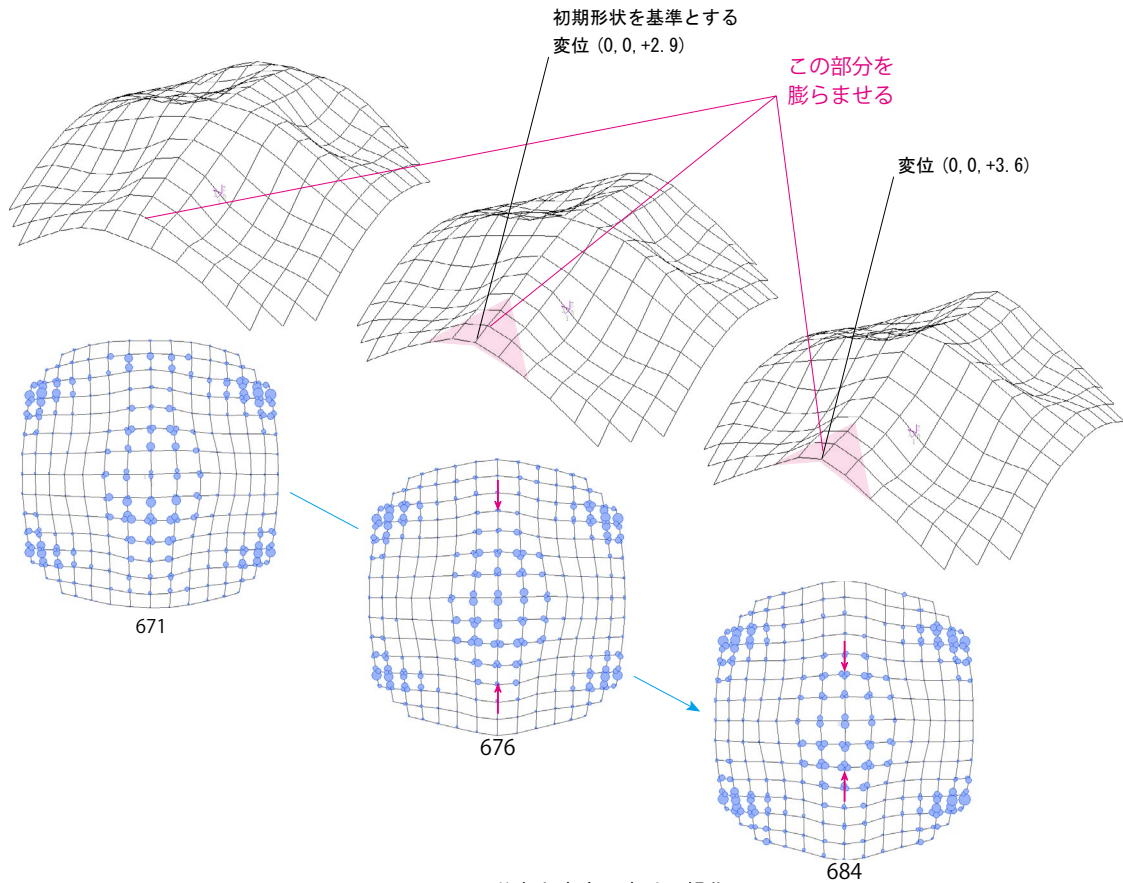


図 4.29 分布を中央へ寄せる操作

図 4.30 は探索の終了時のエネルギー分布である。ややまだばらつきがみられるが、概ね足元と頂部に集中しており、また、図の手前と奥部の振動方向に対して効いているアーチの損傷が抑えられており、初期形状よりもエネルギー分布の発生箇所が改善されたと考える。

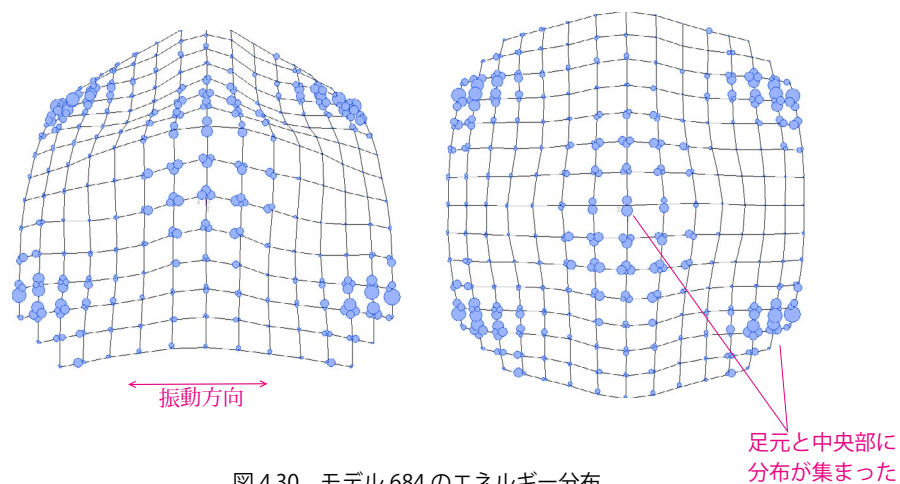


図 4.30 モデル 684 のエネルギー分布

以上で検討した過程を系統図にまとめると次頁の図 4.31 のようになる。吸収エネルギー分布は形状操作によって、前後の縁部に広がって分布していたものが次第に 3 分割され、中央の 2 つが統合して頂点の 1 つになる。このようにドーム形においても形状操作により吸収エネルギー分布が連続的に変わってゆく様子が見られる。

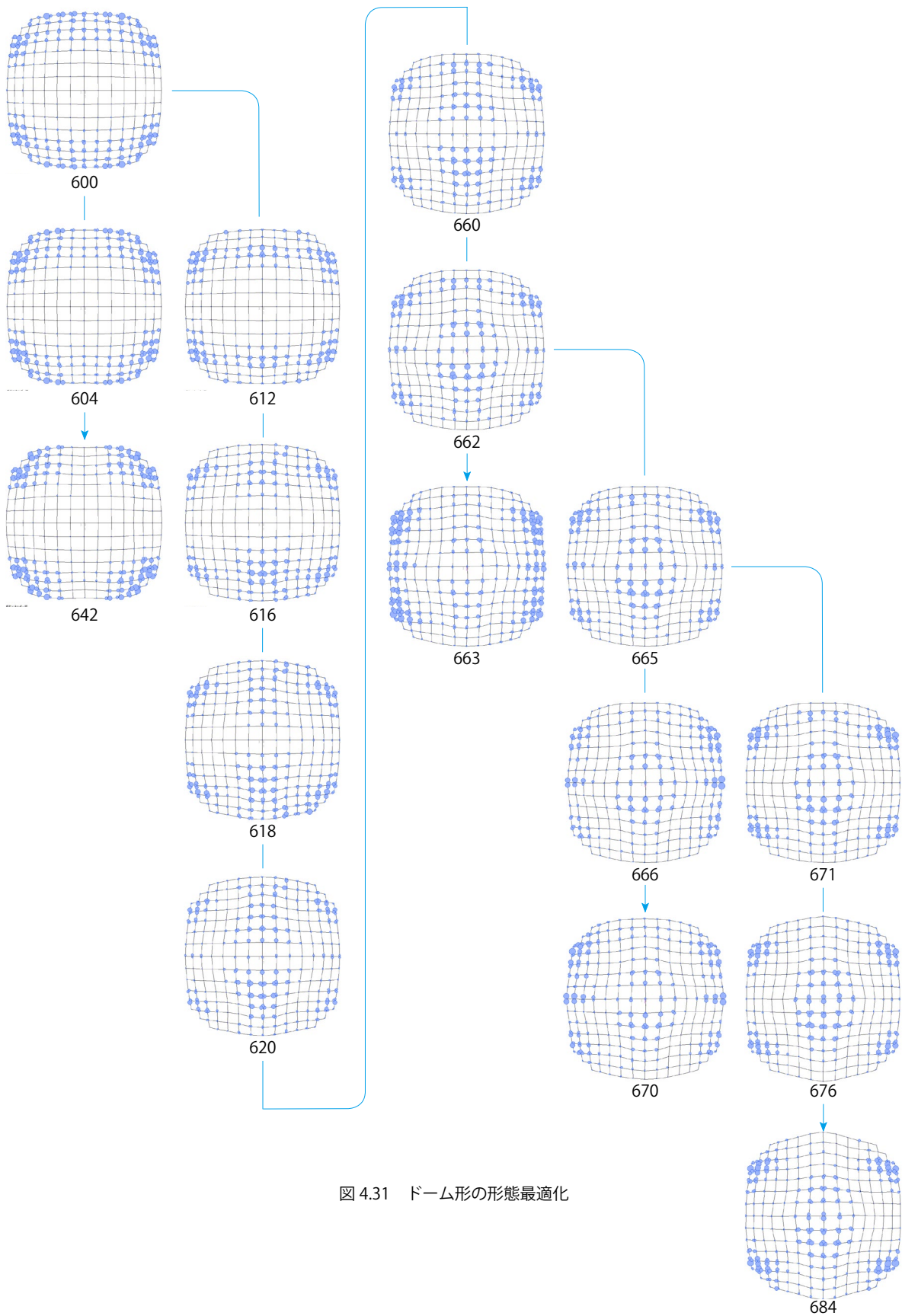


図 4.31 ドーム形の形態最適化

4.2.2 支持部の異なるドーム形の検討

ドーム形状については異なる形状パターンとして角隅1点で接地するモデルを検討する。初期形状は図4.32に示すとおりであり、設計諸元は表4.5に示す。初期形状でのエネルギー分布は図4.33のようになる。この初期形状吸では吸収エネルギー分布が非対称な形となり、四隅で3点ずつ接地する場合と異なる。このエネルギー分布についても同様に最適化を行うことが出来るかを検討する。本検討は4.2.1項のモデル620の過程までを行った。

表4.5 設計諸元

部材断面	○ - 250 × 6 (mm)
材料	SN400
支持条件	ピン支持
自重	0.4 (t/m ²)
1次固有周期	1.2 (s)
基準化	75 (kine)

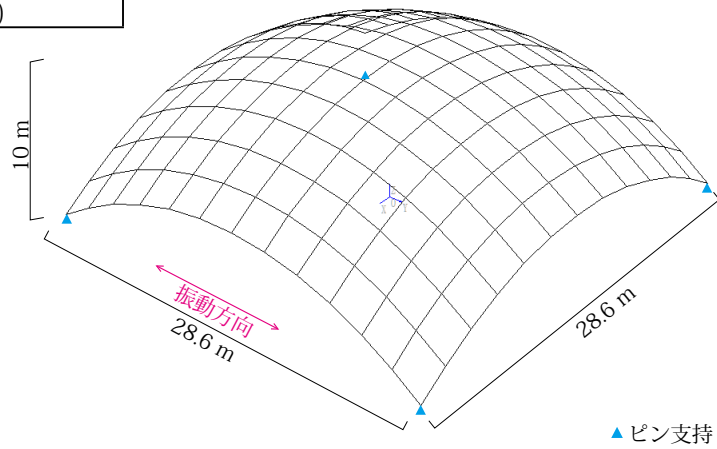


図4.32 初期形状

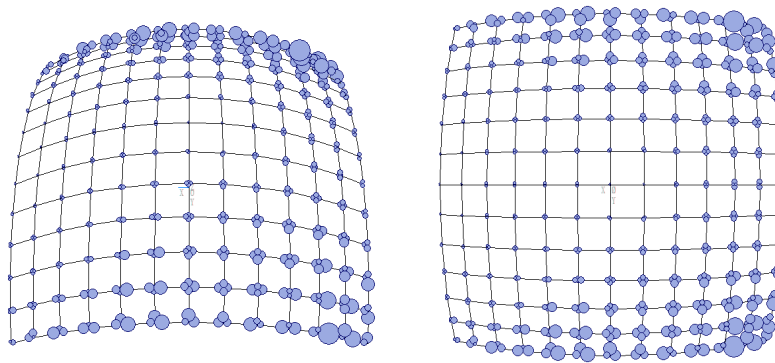


図4.33 初期形状の吸収エネルギー分布

モデル 700 の最適化と同様に対角配置の 4 ヶ所を凹ませると同時に前後縁部の中央を膨らませる操作を行う。図 4.34 のように、最初のうちは左右非対称の分布がみられるが、形態操作を繰り返すうちに前項と同様の左右対称な分布形を示すようになる。

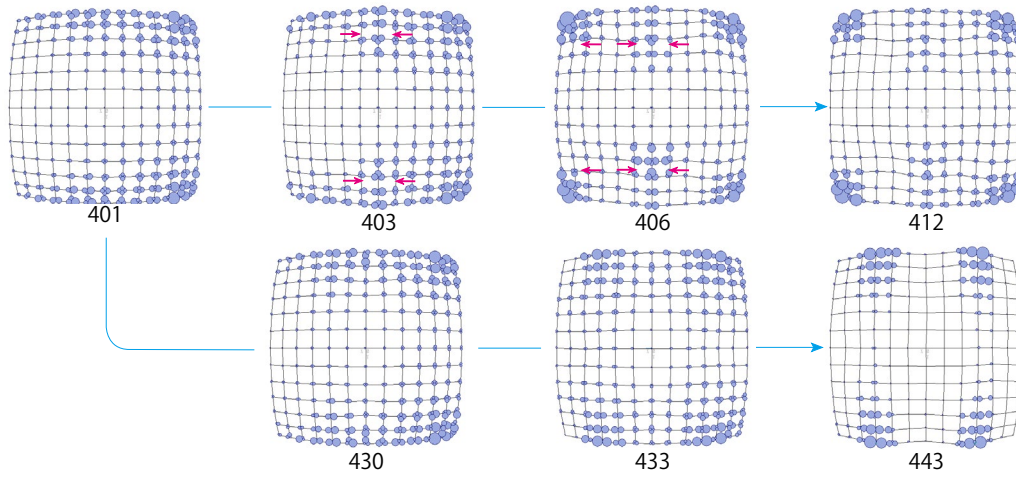


図 4.34 四隅ピン支持のドーム形の最適化

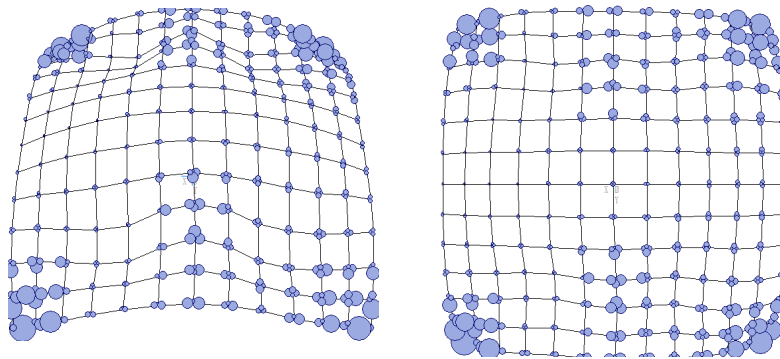


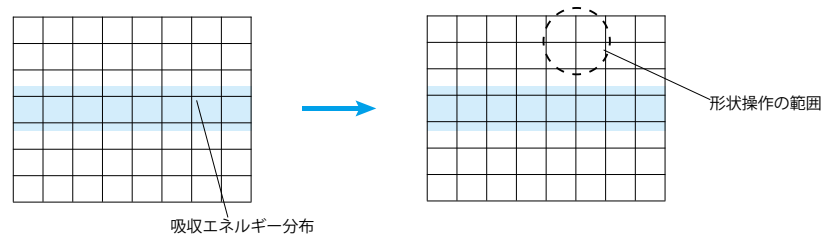
図 4.35 モデル 412 のエネルギー分布

このことから、支持部の条件が異なり、初期形状での吸収エネルギーの分布形が異なっても同様の操作によって目標とするエネルギー分布へ近づけることができた。

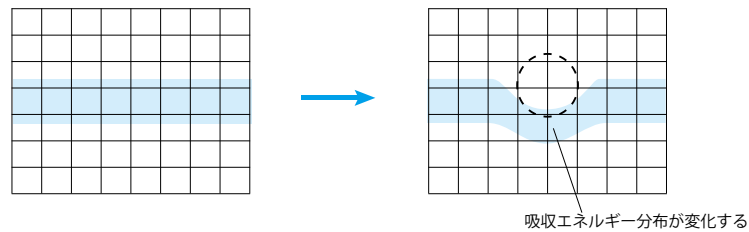
4.3 最適化手法の体系

ここではアーチ形とドーム形の最適形状の探索から吸収エネルギー分布を指標とする最適化の手法を考察する。

まず、対象とするモデルの初期形状での吸収エネルギー分布を求め、形状操作を行う位置を把握する。3章によればエネルギー分布の存在しない領域に形状操作をしても有効な効果は得られない。そのため、最初の手順としては初期形状においてエネルギーが分布する領域に形状操作を行う。



吸収エネルギー分布の位置と形状操作の位置が離れているとき、吸収エネルギー分布は影響を受けない。

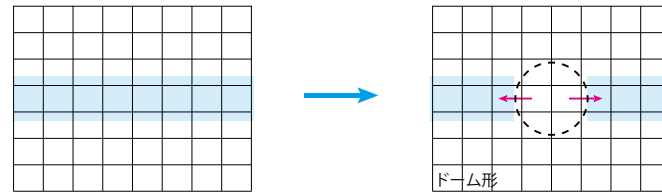
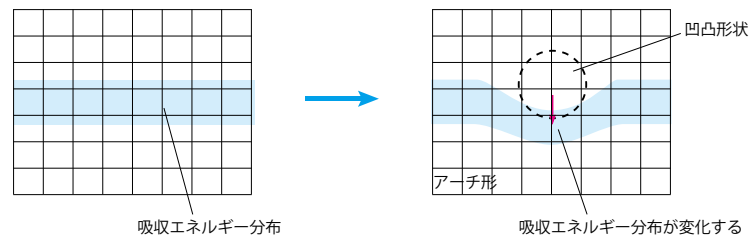


吸収エネルギー分布の位置に重なる位置に形状操作を行うと、吸収エネルギー分布は変化する。変化の様子は形状による。

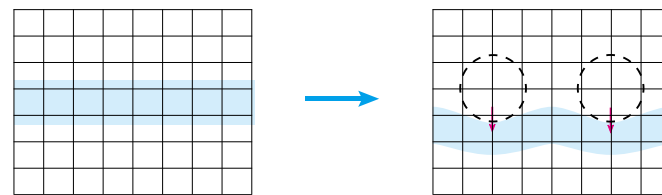
図 4.36 形状操作を行う位置

その上で、基本的な操作に対してエネルギー分布がどのように変化するかを明らかにする必要がある。凹み形状に関しては凹みの位置と分布の変化の関係を知る必要がある。アーチ形とドーム形に共通して見られた特徴として図 4.37 のような変化の仕方がある。広い範囲の分布を移動させるには、図下段に示すような複数の凹凸形状を並べることが有効である。これはアーチ形の足元の分布の移動に効果的であった。また、凹みの深さは移動の範囲にはあまり関係がみられなかった。

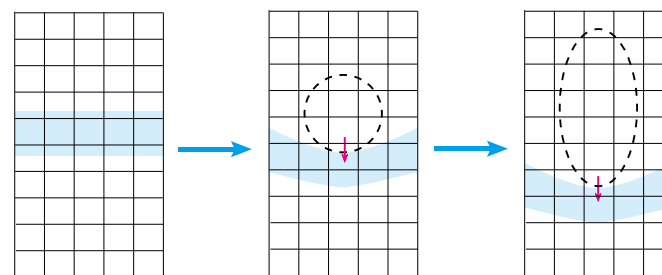
アーチ形の検討から、エネルギー分布をより大きく移動させるには、凹みの大きさを拡大することが有効であった。このとき、分布を動かしたい方向に拮げるだけでは反対側に分布が発生するようになるため、両側に大きくすることが重要である。



吸収エネルギー分布に重なるように凹凸形状を設けると、吸収エネルギー分布は凹凸形状から離れるような分布に変わる。分布の変化の方向や範囲はモデルの形状や凹みの位置によって異なる。



複数の凹形を並べることで効果が合わさり、広い範囲の分布を移動させることができる。



凹形を拡大することでより大きく分布を移動させることができる。

図 4.37 凹凸形状による吸収エネルギー分布の模式図

第4章 最適形状の探索とその手法

初期形状と形状操作による分布の変化の特性から目標とするエネルギー分布を定める。形状の探索は、基本操作のうち目標とする分布に近づく方向のものを出発点とする。形状操作を行ったのち応答解析によりエネルギー分布を得る。次に形状操作を行う位置を選定する。形状操作に対しエネルギー分布は連続に変化することが観察されるので、形状操作の位置や大きさを少し変更したものをいくつか試行し、目標とする分布により近づく操作を選択することも有効である。この操作を繰り返し分布を目標とするエネルギー分布に近づける。アーチ形の過程を簡単に表すと図4.38のようになる。

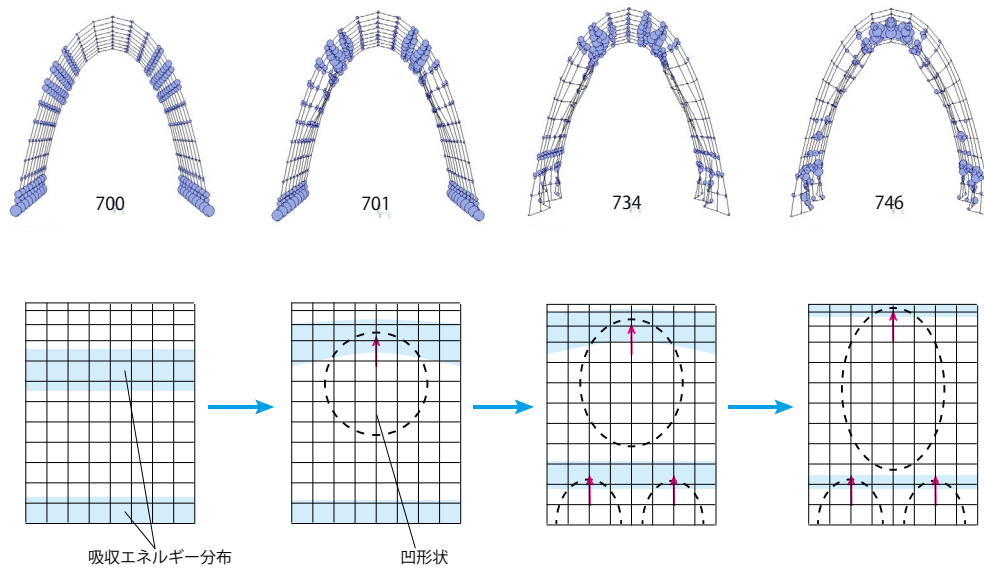


図 4.38 側面から見た吸収エネルギー分布と凹形状の配置の模式図

基本的には分布の発生を抑制したい部分を凹面に加工し、分布を移動させてゆくこととなる。ドーム形のように凸形が凹形と異なる特性を持つ場合は操作の自由度が高くなるが、大筋は凹みによってエネルギー分布を移動させることが考えられる。

複数の基本操作が考えられる場合には同時に行うことも有効である。アーチでは上部と下部の組合せが複数あり、それぞれの組合せについて検討を行った。このように、探索は操作の組合せによって分岐しデータは木構造のようになる。それぞれの枝について目標に近づく方向を探索しながら操作を繰り返すことになる。

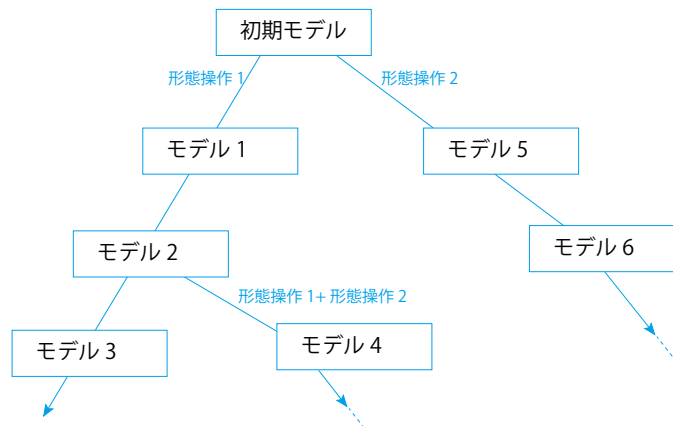


図 4.39 最適形状の探索

探索が進むと収束しやすい組み合わせから最適形態が求まる。例えばアーチ形では足元が内側に凹んだモデル群よりも外側に膨らませたモデルのほうが最適形状を求めやすい。エネルギー分布が重ね合わせ状になることから、先に収束した個体と探索途中の個体を掛け合わせることで新しい個体を作成することも可能である（アーチの例ではモデル 746 はモデル 742 とモデル 734 の掛け合わせ）。この手法はデータの組み換えを行う点で、遺伝的アルゴリズムの交叉と類似の手法ともいえる。

4.4 まとめ

本章では、3章で得られた知見をもとにアーチ形とドーム形の最適形状の探索を行い、目標に設定した分布を与える形状が生成された。この過程において、3章で得られた形状と吸収エネルギー分布の関係性が、吸収エネルギー分布を指標とする形状最適化の操作の方針を与えるものとして有効であることが確認された。形状操作を組み合わせて行う過程では、エネルギー分布は連続的に目標へ近づけられた。ここから形状操作の効果は線形的な重ねあわせになると考えられる。形状操作の組み合わせは複数考えられる場合もあり、複数の組合せを同時進行で探索することが有効と考えられる。本章は以下のようにまとめられる。

- (a) 3章で得られた知見は、最適化途中においても形状操作の指針として有効である。
- (b) 形状操作の効果は線形的に重ね合わされ、エネルギー分布は連続的に目標系へ近づけられる。
- (c) 基本操作の組合せが複数考えられる場合には分岐探索を行うことが有効である。

第5章 結

本研究では、吸収エネルギー分布を評価指標として形状最適化を行う手法について検討を行った。

第2章では、エネルギーの釣合いに基づく耐震設計法の考え方において構造物が地震時に吸収するエネルギー量がエネルギー応答スペクトルによって求まる値であることに基づき、損傷制御の観点から、これを構造の中でどのように分配するかが重要となることを示した。

第3章では、アーチ形とドーム形に対し凹凸状と谷状の局所的な形状操作について整理し、それぞれに次のような特徴的な分布があることが判明した。

- (1) エネルギー分布発生個所に凹凸状の形状操作を行うと、吸収エネルギー分布が凹凸部を避けるように移動する。
- (2) 振動方向と平行に谷状の形態操作を行うと、谷線・稜線に吸収エネルギーの集中が発生する。

第4章では前章で検証した形状操作を実際に適用し、目標に設定した吸収エネルギー分布を与えるような形状が作成できることを示し、手法の有効性を示した。またこの過程から、次のような知見が得られた。

- (a) 上記(1)(2)の知見は、最適化途中においても形状操作の指針として有効である。
- (b) 形状操作の効果は線形的に重ね合わされ、エネルギー分布は連続的に目標系へ近づけられる。
- (c) 基本操作の組合せが複数考えられる場合には分岐探索を行うことが有効である。

本研究では、アーチ形と四隅支持のドーム形について検討を行うことで、吸収エネルギー分布を評価指標とする形状最適化手法の大筋が示された。ここで示した事項の多くは経験則の域であり、形状とエネルギー分布の力学的な関係や性能の評価方法といったより詳細な理論化は今後の研究に期待したい。

謝辞

本論文の執筆に当たりご指導、ご教授くださった全ての方々に感謝申し上げます。本論文をこのようにまとめることができたのは、皆様の多大なるお力添えのおかげと存じます。

東京大学准教授 佐藤淳先生には、指導教員として研究の手法や方針について懇切丁寧にご教授賜り心より感謝申し上げます。地震に対して最適な曲面の形というのは以前より興味を抱いていたものであり、この研究テーマを与えて下さりこの論文として纏めることが出来たことは大変喜ばしく思います。また、先生には個人的相談にも大変親身に応じていただき、貴重なお時間をさいてご対応くださいました。至らない自分を反省するとともに、重ねて御礼申し上げます。

東京大学准教授 佐久間哲哉先生には、副指導教員として研究内容や論文構成について多くのご意見また的確なご指摘を賜り、論文を纏める上で大きな助けとなりました。ここに深く感謝申し上げます。

研究室の荒木さん、都筑さん、古市さんには、研究室活動において様々な面で大変お世話になりました。研究を支えてくださった研究室職員、佐藤淳構造設計事務所の皆様に感謝申し上げます。

研究室の先輩方にも多くのことを学ばせてもらいました。同期、後輩の存在は研究を行う上で大きな励みとなりました。皆様に感謝申し上げます。

最後になりましたが、長い学生生活を支え見守ってくれた両親と家族に感謝を申し上げます。

2019年1月21日

阪田 実

参考文献

- [1] 川面恵司, 横山正明, 長谷川浩志:「最適化理論の基礎と応用」コロナ社, 2000
- [2] 藤井大地:「建築デザインと最適構造」丸善出版, 2008
- [3] 山田 侑輝, 佐々木睦朗: 水平地震動時の歪エネルギーと冗長性を目的関数としたラチスシェルの形態創生に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 2013(構造 I), 2013
- [4] 藤田 慎之輔, 大崎 純, 關 和也: 線織面で構成されるラチスシェルの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.730, 2016
- [5] 森本 崇, 下田 昌利: 固有振動数最大化を目的とする空間骨組構造の形状最適化, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.809, 2014
- [6] 秋山宏:「エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計」技法堂出版, 1999
- [7] 中村卓史, 佐藤淳: 地震時の吸収エネルギー分布に着目したドーム型曲面の局所操作による形状最適化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017
- [8] 佐藤淳:「佐藤淳構造設計事務所のアイテム」INAX 出版, 2010