

# 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

学籍番号 47166736  
氏名 阪田 実 (Sakata, Minoru)  
指導教員 佐藤 淳 准教授

### 1 序

#### 1.1 研究の背景

構造最適化は特定の制約条件のもとで構造の性能を最大化する手法である。近年の設計・施工技術の発展により最適化で生成される複雑な形状も実現できるようになります。実際の設計は多目的最適化問題であるが、性能の評価指標を限定する手法も多く提案されており、様々な指標が試みられている。本研究ではそのうちの一つ、大地震時の構造物の損傷分布について考える。日本は地震多発地域であり、東南海地震や直下型地震なども予想されている。大地震時には構造の損傷は許容されるが倒壊や崩壊を起こさないことが目標とされる。そのため、損傷が適切に配置される設計を行う必要がある。多層ラーメン構造については秋山によりエネルギーの釣合いに基づく建築物の耐震設計<sup>[1]</sup>として体系化がなされている。本研究で扱う単層の3次元曲面構造物については中村による先行研究<sup>[2]</sup>があり、本研究はその手法を多くの全体形状や局所形状に適用し、設計目標を明確にすることを試みる。

#### 1.2 研究概要と目的

エネルギー法<sup>[1]</sup>の考え方では、損傷は部材疲労の蓄積であり部材端の吸収エネルギーによって評価できる。そこで本研究で

は、地震時の吸収エネルギー分布を評価指標として形状の評価を行う。吸収エネルギー分布は時刻歴応答解析により求められる。3次元曲面構造の代表としてアーチ形と4隅支持のドーム形のモデルについて検討する。このモデルに局所的な形状操作を施し、形状の差異によって吸収エネルギー分布がどのように異なるかを整理する。その上で、これらの形状操作を組み合わせることによる最適形状の探索を試みる。

表1 アーチ形設計諸元

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

表2 ドーム形設計諸元

部材断面	○ - 250 × 6 (mm)
材料	SN400
支持条件	ピン支持
仕上げ材質量	0.4 (t/m <sup>2</sup> )
1次固有周期	1.2 (s)
基準化	75 (kine)

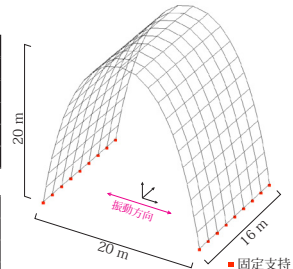


図1 アーチ形

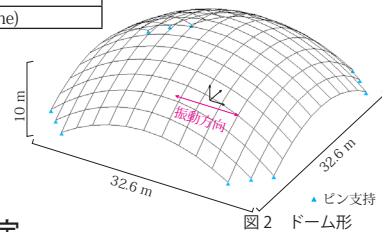


図2 ドーム形

## 2 理論

### 2.1 解析の設定

時刻歴応答解析において減衰は初期剛性比例型とし減衰定数 0.02 とする。地震波は兵庫県南部地震 JR 鷹取駅観測波の南北成分を用いる。先行研究<sup>[2]</sup>によれば吸収エネルギーの分布形は地震波によらないことが示されている。解析モデルの諸元は、アーチ

形は図1、表1、ドーム形は図2、表2の通りである。ドーム形は底辺直径40mの回転体ドームの4辺を切り落とした形状である。

## 2.2 エネルギー法の理論

秋山<sup>[1]</sup>のエネルギー法の理論では振動方程式から地震時のエネルギーに関する次の基本式(1)を導く。

$$W_e + W_h + W_p = E \quad (1)$$

式の各項は弾性振動エネルギー  $W_e$ 、減衰によるエネルギー吸収量  $W_h$ 、累積塑性歪みエネルギー  $W_p$ 、総エネルギー入力  $E$  である。ここで累積塑性歪みエネルギー  $W_p$  とは、塑性ヒンジにおいて吸収されたエネルギーの総量である。各塑性ヒンジで吸収されるエネルギー量は部材の損傷度と解される。(1)式は振動終了時において  $W_p \simeq E$  となり、また、 $E$  は構造物の固有周期によって定まる値である。これにより固有周期が同一の構造物では塑性ヒンジにおいて吸収されるエネルギーの総量は概ね一致し、その分布が安全性の指標となる。

## 3 形状の基本操作と分類

局所的な形状操作は、モデルの対称な位置に凹凸もしくは谷状の形状変更を加えることとする。これを1回行うことを基本操作と呼ぶこととする。ここでは、基本操作の前後のモデルについて吸収エネルギー分布の違いを考察する。

### 3.1 凹凸形状

モデルに凹凸を設けた場合のエネルギー分布を図5に示す。初期形状(図4)と比較するとアーチ形ではいずれも凹凸部のエネルギー分布が減少することが分かる。これは凹凸の周囲で局所的に剛性が高まり、応力がそちらへ移行したためと考えられる。ドーム形では凹形状はアーチと同様に凹部から離れる傾向がみられるが、凸形状では膨らみ部に集中した分布となる。

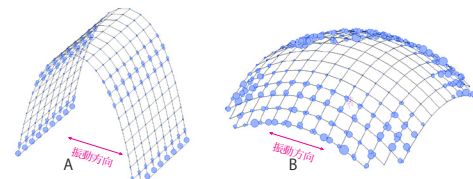


図4 初期形状の吸収エネルギー分布

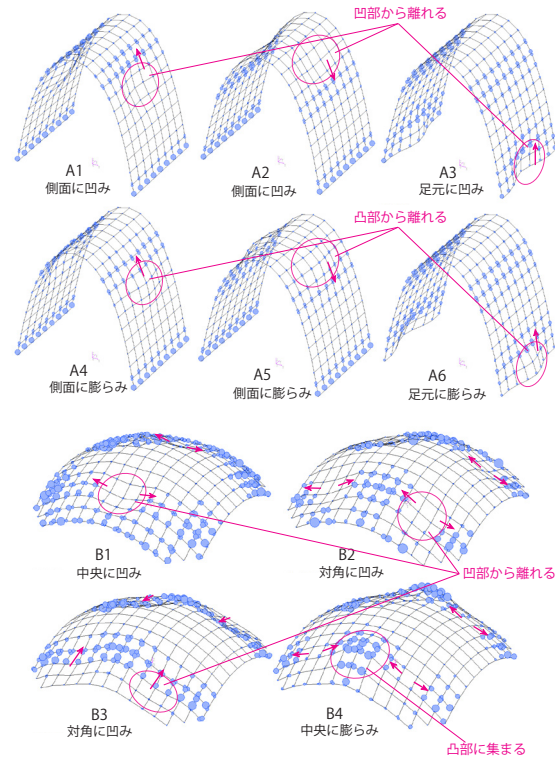


図5 凹凸形状とエネルギー分布

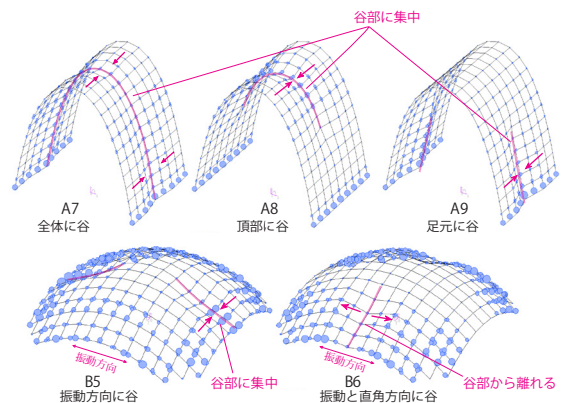


図6 谷形状とエネルギー分布

### 3.2 谷形状

モデルに谷状の窪みを設けるとエネルギー分布は図6のようになる。ここでは谷の方向によって効果が異なる。振動方向に平行な谷形状では谷線に集中した分布となる。一方振動に直交方向の谷形状では凹形

状を与えるのと同じく分布が離れる効果が表れる。これは、振動に平行な場合、剛性の高まった谷部が振動に抵抗するような機構となるためと考えられる。

### 3.3 形状とエネルギー分布の関係

以上の検討によって凹凸形状と谷形状にはそれぞれ図7のような特徴的な分布があることが示され、次のようにまとめられる。

- (1) アーチの凹凸、ドームの凹形状では吸収エネルギーは凹凸から離れるように分布する。
- (2) 振動方向の谷形状では谷線に吸収エネルギー分布が集中する。

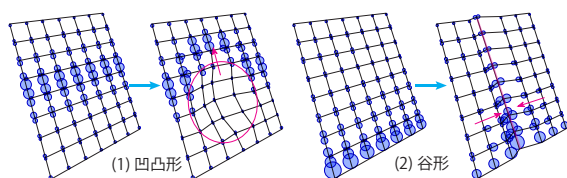


図7 形状とエネルギー分布 模式図

また、異なる形状操作でも結果的に類似した形状となる場合があり、例えば図8は異なる形状操作によって得られる形状であるが、空間の大きさが異なるものの、エネルギー分布には類似性がみられる。共通する形状の特徴がこのエネルギー分布に寄与していると考えられる。

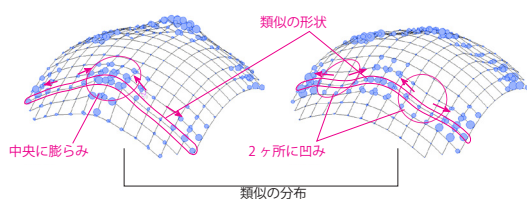


図8 類似の形状とそのエネルギー分布

図9のように凹みの位置を変えると、エネルギー分布は連続的に変化することが観察される。

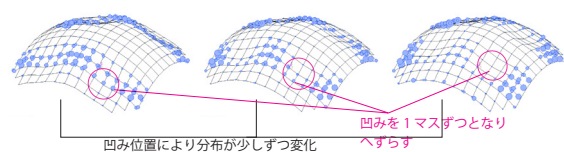


図9 凹み位置とエネルギー分布の関係

複数の形状操作を同時に行う場合には、図10のように個別の操作時の分布の組合せで考えられる。

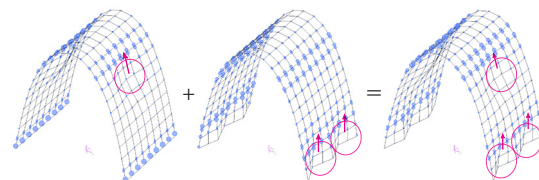


図10 形状操作の組合せ

## 4 最適形状の探索

以上のような形状とエネルギー分布に関する知見をもとに、実際に最適形状の探索を行い最適化手法について考察する。

### 4.1 最適化問題の設定

試行を行う前に目標とする損傷分布を考える。損傷分布は、アーチ形であれば例えば図11のようなものが考えられる。図の(a)のような分布は多くの部材にエネルギー吸収を負担させる分布形であり、最も材料効率は良いが不安定度が高いと考えられる。一方(d)のような分布形は塑性ヒンジの発生箇所がスリーヒンジ状の3ヶ所だけであり、安定度の高い崩壊形であるといえる。(a)(b)(c)のような損傷分布は機構的に危険であるといえ、ここでは(d)の分布を与える形状を求めることとする。

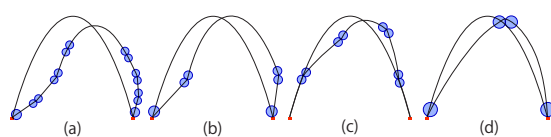


図11 損傷分布

### 4.2 探索の過程と結果

繰り返しの形状操作によって分布を目標に近づける。また、基本操作の組み合わせにより分岐探索を行う。

図12にアーチ形の探索の概略を示した。肩部の操作は凹みとし、足元の形状操作について脚部の形状操作は外向きの凸と内向きの凹形状を試みたが、凹形状については

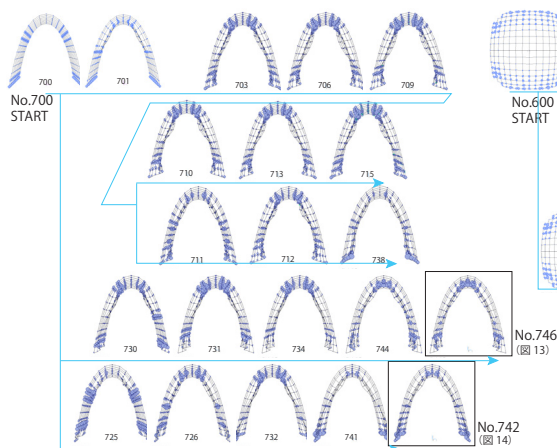


図 12 アーチ形の最適形状の探索

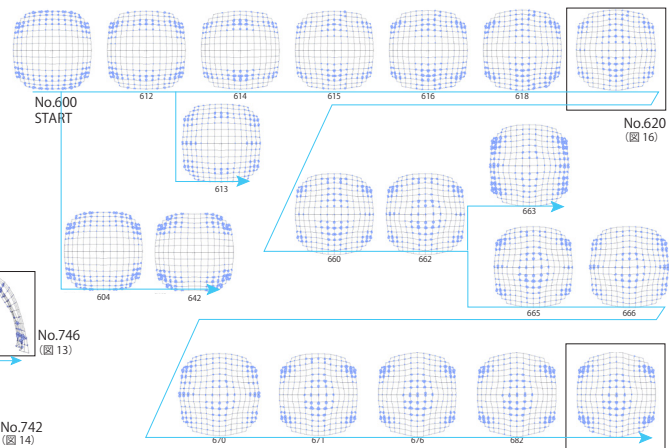


図 15 ドーム形の最適形状の探索

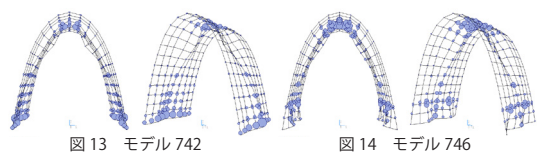


図 13 モデル 742

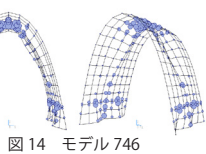


図 14 モデル 746

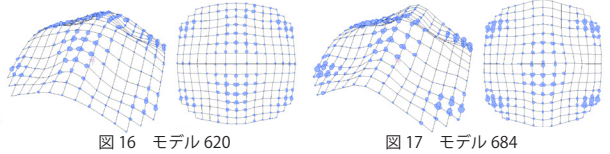


図 16 モデル 620

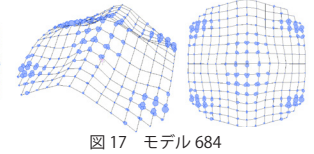


図 17 モデル 684

凹部 1 つでは下部の分布が集中せず凹部を 2 つに変更した。肩部の凹みを上下に拡大してゆくと次第にエネルギー分布は頂部と足元に集まり、結果、モデル 742 と 746 の 2 種類のスリーヒンジ状エネルギー分布を持つ形状が得られた。モデル 746 は足元の基部ではなくやや上方に分布を持つ。

図 15 はドームに対する最適化の過程である。ドーム形の場合は目標とする損傷分布について検討の余地があるが、本検討ではアーチ形と同様の脚部と頂部の分布とした。対角の位置の 4 ヶ所を凹ませる操作によってモデル 620 のような分布が得られる。ここからさらに凹凸操作を繰り返しモデル 684 を得た。おおよそ頂部と脚部に集中しこれをもって終了とした。

探索過程では、基本形状で確認された以外の部分にもエネルギー分布が発生するが、いずれにしても凹みの操作によりその部分の分布を少なくなるように変更できることが判明した。またエネルギー分布は各形状操作の繰り返しによって連続的に目標へと近づけられることが確認された。

## 5 結

本研究では、形状最適化における評価指標として大地震時の吸収エネルギー分布に着目し、アーチ形とドーム形という 3 次元の曲面構造に対して形状操作によって吸収エネルギー分布を操作する手法を検討した。結果、凹凸の操作では凹凸部から離れるように、振動に平行な谷状の操作では集まるように分布の形が変わることを示した。さらに最適形状の探索法として、形状操作の線形的な組み合わせによって分布を連続的に目標へ近づけられることが示され、形状と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操作の指針を与えるものとして有効であると確認された。本研究は定性的な分析を行ったが、今後さらに力学的、定量的な検討を重ね、最適化手法として体系化されることが期待される。

### 参考文献

- [1] 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
- [2] 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