

# 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

Shape Optimization by Local Morphing of Dome Type Curved Surface Focused on the  
Absorbed Energy by Earthquakes

学籍番号 47-156749  
氏 名 中村 卓史  
指導教員 佐藤 淳 准教授

## 1. 研究概要

### 1-1. 研究の背景と目的

近年の計算機技術の急速な発展に伴う構造解析やシミュレーション技術、施工技術の高度な発達、幾何学的形態にとられない自由な形態を持つ構造物の実現に寄与してきた。構造最適化は、現在建築においても大いに活用が期待されている。構造最適化は、ある制約条件の下、目的関数と呼ばれる評価関数を最小化あるいは最大化する最適化問題の一分野として発展してきた。また、日本は世界有数の地震多発国であり、これまで数多くの大地震を経験してきたが、今後発生する可能性のある巨大地震に対しては、現在の耐震基準に適合している建築物であっても大きな構造被害が発生する可能性が否定できず、構造設計および耐震設計の新たな道筋を示す必要がある。以上から、地震動の応答を考慮した構造最適化を提案し、新たな形状の可能性を示すことで、現在の設計指針では発想できない建築物の形状の在り方を示したい。

### 1-2. 研究の方法

研究室にて共有されている解析プログラムを主に使用し、ドーム型曲面を持つ建築物に対して地震動入力による時刻歴応答解析を行う。吸収エネルギーの算出方法は後

述するが、本研究では地震動入力時の吸収エネルギーを対象とするため、累積塑性ひずみエネルギーの分布を形状操作の指標とする。本研究では数値解析による最適化にいたる以前の段階で、ある指標により近づけることを最適化と定義する。得られた分布から、形状操作し再度時刻歴応答解析を行い、分布への影響を確認することで、形状最適化への端緒とする。

## 2. 地震応答時のエネルギーに関する理論

エネルギー吸収に関する理論は、秋山の理論<sup>1)</sup>を用いる。以下に基本概念を引用する。(1)式には1自由度系の振動方程式を、(2)式にはエネルギーの釣り合い式を示す。

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + F(y) = -M\ddot{z}_0 \quad (1)$$

$M$  : 質点質量、 $C\dot{y}$  : 粘性減衰力、 $F(y)$  : 復元力、 $-m\ddot{z}_0$  : 地震外力、 $y$  : 地震による地動変位、 $z_0$  : 質点相対変位である。

(1)式の両辺に微小時間における系の変位量を乗じて地震動の全継続時間  $t_0$  で積分するとエネルギーの釣り合い式を表す(2)式が得られる。

$$\int_0^{t_0} M \ddot{y} \dot{y} dt + \int_0^{t_0} C \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_0} F(y) \dot{y} dt = - \int_0^{t_0} M \ddot{z}_0 \dot{y} dt \quad (2)$$

(2)式において左辺第1項は地震終了時の運動エネルギー、第2項は粘性減衰による吸収エネルギー、第3項は累積塑性ひずみ

エネルギー、そして右辺は地震動による系へのエネルギー入力 の総量  $E$  を表す。ここで、このエネルギー入力 の総量  $E$  は全質量と固有周期に依存し、構造物の強度、質量分布、剛性分布に安定した量であることを思い出し、エネルギー入力 の最大値を  $E_{\max}$  とするならば、建物の総質量  $M$  と速度応答スペクトル  $V_E$  を用いて (3) 式のように表現することができる。横軸に固有周期、縦軸に  $V_{E\max}$  の値を取ったものをエネルギースペクトルと呼ぶ。

$$E_{\max} = \frac{1}{2} M \cdot V_{E\max}^2 \tag{3}$$

### 3. 各地震波によるエネルギー分布の変化

#### 3-1. 概要

表 3-1 には解析諸元を、図 3-1 には本検討で使用したモデルを示す。本検討では、アーチ形状の骨組モデルに対して時刻歴応答解析を行い、地震波の違いによる累積塑性ひずみエネルギー分布の変化を把握することを目的とする。モデルはスパン 20[m]、ライズ 20[m] の放物線に近似させたアーチに奥行き 10[m] をもたせたモデルを使用した。また、表 3-2 には本検討で使用した地震波諸元を、図 3-2 には本検討で使用した地震波のエネルギースペクトルを示す。本検討では、5 つの観測波を入力した。入力エネルギーの面で検討するため、使用するモデルの 1 次固有周期における入力エネルギーが等しくなるようにそれぞれにある倍率を乗じ、 $V_{E\max}$  が 400[cm/s] となるよう予め調整した上で入力した。

表 3-1 解析諸元

使用断面[mm]	H-300×300×10×15
スパン[m]	20
ライズ[m]	20
床厚長さ[m]	5
一次固有周期[s]	1.14
継続時間[s]	40
刻み時間[s]	0.02
履歴型	初期剛性比例型
減衰定数[%]	0.02

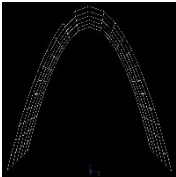


図 3-1 解析モデル

表 3-2 地震波諸元

入力地震波	略称	$V_{E\max}$ [cm/s]
1940年Imperial Valley地震El Centro観測波南北成分	el_ns	400.1
1952年Kern County地震Taft観測波東西成分	taft_ew	400.2
1968年十勝沖地震八戸港湾観測波東西成分	hachi_ew	400.3
1978年宮城県沖地震東北大学工学部建築学科棟1F観測波東西成分	tohoku_ew	400.2
1995年兵庫県南部地震JR鷹取観測波南北成分	takatori_ns	400.1

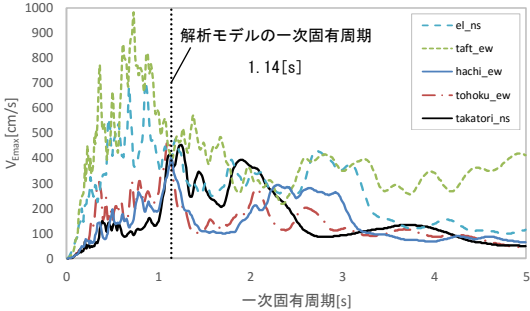


図 3-2 エネルギースペクトル (h=0.02)

#### 3-2. 結果および考察

図 3-3(A)、(B)、(C)、(D)、(E)にはそれぞれ el\_ns、taft\_ew、hachi\_ew、tohoku\_ew、takatori\_ns 入力時の累積塑性ひずみエネルギー分布図を示す。el\_ns、taft\_ew、takatori\_ns では塑性ヒンジが生成され塑性ひずみエネルギーの吸収が行われたものの、hachi\_ew と tohoku\_ew では塑性ヒンジが生成されなかった。これは、調整に使用したエネルギースペクトルが弾性範囲のものであり、弾塑性範囲の解析により固有周期にずれが生じ、想定したエネルギー入力が行われなかったことが原因であると考えられる。そのため、適切なエネルギー入力を行うためには、(1)弾塑性範囲におけるエネルギースペクトルによるエネルギー入力の調整、(2)固有周期のずれに影響されないバイリニア型エネルギースペクトルを有する加速度波形の作成の 2 つのパターンの解決策が考えられる。図 3-4 には takatori\_ns の位相を用いて作成した 2)3)バイリニア型エネルギースペクトルを示す。また、エネルギー分布図が得られた 3 波では、大きく見ればアーチの左右に

エネルギーが集中しているが、詳細に見ればわずかに違いが見られる。地震動の特徴とエネルギー分布の関係性を探ることは今後の課題となる。

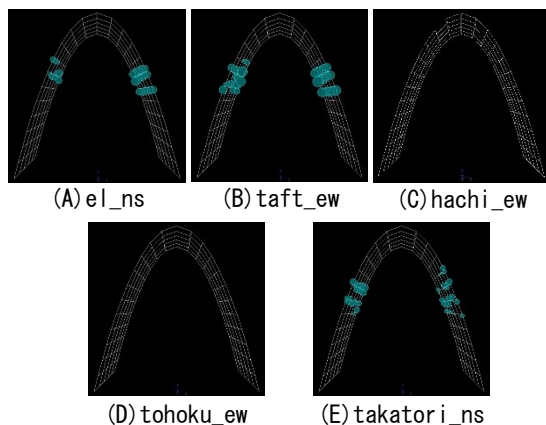


図 3-3 エネルギー分布図

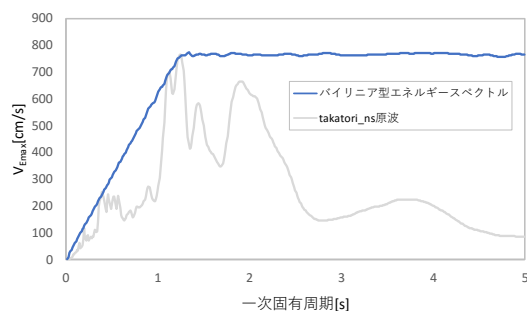


図 3-4 バイリニア型エネルギースペクトル (h=0.02)

#### 4. 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形状最適化

##### 4-1. 概要

表 4-1 には解析諸元を、図 4-1(A)、(B)には本検討で使用したモデルを示す。本検討では、ドーム型曲面モデルに対して時刻歴応答解析を行い、累積塑性ひずみエネルギーの分布を把握した上で、形状操作を行い、再度時刻歴応答解析により累積塑性ひずみエネルギーの分布の変化を確認し、本研究の有用性を確認することを目的とする。モデルはスパン 20[m]、ライズ 20[m]の懸垂線に近似させたアーチに奥行き 10[m]をもたせたモデル、また、このアーチを回転させて

得られた底面直径 20[m]、高さ 20[m]ドームを使用した。表 4-2 には本検討で使用した地震波諸元を、図 4-2 には本検討で使用した地震波のエネルギースペクトルを示す。本検討では、十分な塑性ヒンジの生成を得るために、地震波を 150[cm/s]に基準化した上で、各モデルの一次固有周期をエネルギースペクトル上での値が最も大きくなる一次固有周期になるようそれぞれのモデルのヤング率を調整して一次固有周期を変更した上で解析を行った。

表 4-1 解析諸元

使用断面[mm]	H-300×300×10×15
最大スパン[m]	20
高さ[m]	20
座屈長さ[m]	5
一次固有周期[s]	1.24
継続時間[s]	40
刻み時間[s]	0.02
履歴型	初期剛性比例型
減衰定数[%]	0.02

表 4-2 地震波諸元

入力地震波	略称	$V_{E_{max}}$ [cm/s]
1995年兵庫県南部地震JR廣取駅観測波南北成分	takatori_ns	851.3

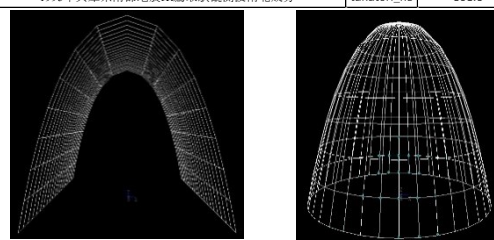


図 4-1 解析モデル図

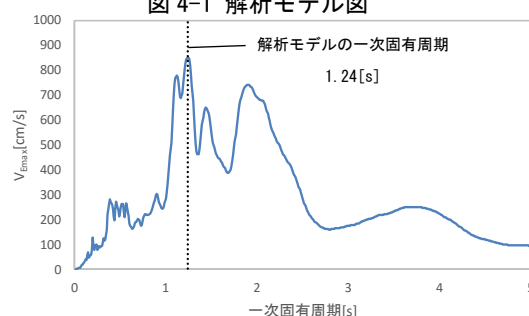


図 4-2 エネルギースペクトル (h=0.02)

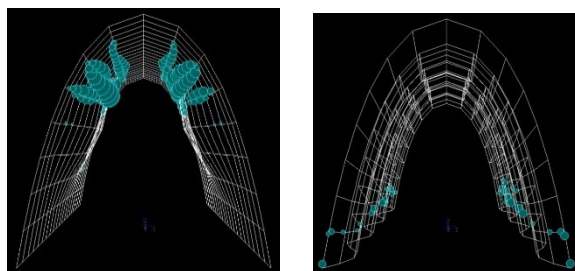
##### 4-2. アーチモデルでの結果

図 4-3 に初期形状でのエネルギー分布図を示す。アーチの左右にエネルギーが集中していることが見て取れる。そこで、今回形状操作の方針として上部を凹ませる(操作 A)、支持部分を凹ませる(操作 B)という 2 つ

の操作を行い、それぞれアーチ A、アーチ B というモデルを作成した。それぞれのモデルについて再度時刻歴応答解析を行い得たエネルギー分布図を図 4-4(A)、(B)に示す。アーチ A ではエネルギー集中が上部に移動し、アーチ B では支持部分に移動したことがわかる。



図 4-3 初期形状のエネルギー分布図



(A) アーチ A (B) アーチ B

図 4-4 エネルギー分布図

#### 4-4. ドームモデルでの結果

図 4-5 に初期形状でのエネルギー分布の斜視図を示す。ドームの下部に扇形状にエネルギーが分布していることが見て取れる。この結果から、アーチと同様の形状操作を行いそれぞれドーム A、ドーム B というモデルを作成した。それぞれのモデルについて再度時刻歴応答解析を行い得たエネルギー分布の斜視図を図 4-6(A)、(B)に示す。

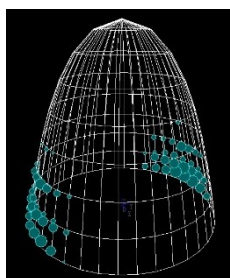
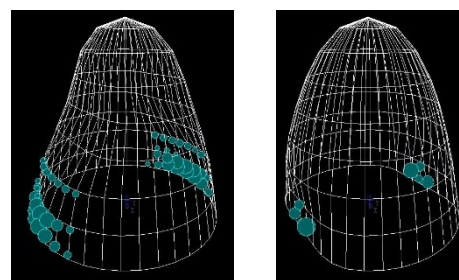


図 4-5 初期形状のエネルギー分布図

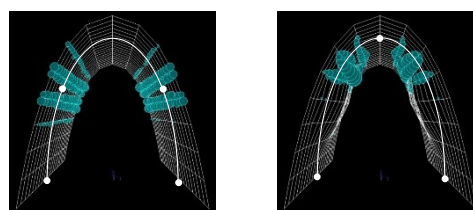


(A) ドーム A (B) ドーム B

図 4-6 エネルギー分布図

#### 4-5. 考察

どちらの場合でも形状操作によりエネルギー分布の操作が可能であることが確認できた。また、エネルギー分布の操作は、推測される崩壊形状の操作に繋げることができる。図 4-7 のように 4 ヒンジアーチから 3 ヒンジアーチのようなより安全な崩壊形状に近づけられる可能性がある。



4 ヒンジアーチ 3 ヒンジアーチ

図 4-7 推測される崩壊形状

#### 4. 結論および今後の展望

本検討ではまず地震波によるエネルギー分布の相違を確認し、有効な検討方法を示した。また、形状操作によるエネルギー分布の操作が可能であることを確認し、エネルギー分布の操作が推測される崩壊形状をより安全にする可能性を示した。本検討で得られた知見を活かし、更に多くの形状および形状操作についての検討を行い、形状最適化手法として確立されることを期待する。

#### 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, 技報堂出版, 1999, 11
- 2) 松田泰治, 大塚久哲, 内藤伸幸, 地震入力エネルギーに基づく模擬地震波の作成について, 第 5 回地震時保有体力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム, 2002
- 3) 大崎順彦, 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.5