

面外剛性および長期安全率に着目した単層ラチスドームの地震応答特性に関する基礎的研究

Fundamental Study on Seismic Response of Single-Layer Lattice Domes Focusing on Out-of-Plane Stiffness and Long-Term Safety Factor

○高井佑輔¹, 田崎隼斗¹, 栗原大樹², 石鍋雄一郎³, 中島肇⁴

*Yusuke Takai¹, Hayato Tasaki¹, Daiki Kurihara², Yuichiro Ishinabe³, Hajime Nakajima⁴

Abstract: It is important to find out the relationship between the design level (safety factor) and the seismic response to the fixed loads, because the fixed loads are dominant in domed structures. In addition, the seismic response of a dome structure is more complex than that of a multi-story structure because of the coupling of vibration modes with many adjacent natural frequencies. In this study, the effects of out-of-plane stiffness and long-term safety factor on the seismic response of a dome structure are investigated in order to understand the seismic response behavior of the dome.

1. はじめに

ドーム構造物は固定荷重が支配的であるため、部材断面の設計は固定荷重に対して、ある程度の余裕(安全率)を持って決定されることがほとんどである。しかし、日本のような地震の多い地域においてそのようにして決定された断面を持ったドームが地震時にどのような応答を示すかを把握することは重要である。特に、空間構造の地震時の応答特性として、大スパンのドーム構造物では一般的な重層構造とは異なり、水平地震動を受けた際に屋根各部が鉛直方向への応答が励起されることに加え、多くの近接した固有周期をもつ振動モードが連成されるため地震時の応答が複雑に変化することが知られている^[1]。既往の研究において、複層ドームのように面外剛性が高い場合には主要な振動モード数が限定されることが示されており、このことから、単層ラチスドームにおいても特定の条件では、応答を単純化することが出来ると考えられる。

本研究では、ドームの安全率が地震時の応答性状に与える影響を把握すること、ドームの地震時の応答を単純化することを目的として、面外剛性および長期安全率が地震応答性状に与える影響について検討を行う。

2. 解析概要

固有周期、振動モード、有効質量比などの検討モデルの振動特性を把握するため、モデルを作成し固有値解析を行う。

解析モデルは、ドーム部だけのモデルとする。スパンLは100mとし、ライズ/スパン比(以下H/L)は0.1, 0.15, 0.25の3パターンとする(Figure1)。

ドーム構造は円形平面の単層ラチスドームとし、最外周のフープ材をテンションリングとする。ドームの固定荷重は、単位面積当たりの重量1.5kN/m²とし各節点に集中荷重として作用させる。ドームを構成する部材は、ラチス部材とテンションリング部材の2種類とし、SN400の鋼管とする。なお、部材は各節点で剛接合とし、境界条件はピン支持とする。ドームの稜線部を20分割する部材を基本部材とし、基本部材長さ ℓ_0 は529.4cm、部材細長比 λ_0 は60とする。本研究では管厚tを6mmとして固定し、ラチス

部材の管径 d_0 、テンションリングの部材径 d_t は管径 d_0 の2倍と仮定し、断面積A、断面二次モーメントIは、以下の近似式より設定する。

$$d_0 = 2\sqrt{2} \times \ell_0 / \lambda_0 \quad (1)$$

$$A = \pi \times d_0 \times t \quad (2)$$

$$I = \frac{\pi}{8} \times d_0^3 \times t \quad (3)$$

ドームを構成する部材の変化が地震時の応答に与える影響を検証するため、仮定した基本部材で構成されたドームを基本モデルとし、基本モデルの部材の断面積(管径)を2倍、5倍とした場合についてのモデルも作成する。なお、部材断面積が2倍、5倍となることによって得られる断面二次モーメントIの大きさは、基本モデルと比較してそれぞれ8倍と125倍である。また、文献^[2]を参考にドームの1節点当たりの座屈荷重に対する節点荷重を算出し、長期安全率とする。H/L=0.15のモデルの長期安全率は基本モデルで4.14倍となっており、部材断面積が2倍、5倍されることによって長期安全率は8.27倍、20.68倍となる。

3. 解析結果

固有値解析結果より、有効質量比の大きいモードを検討モデルにおける主要な振動モードとして、有効質量比の大きい順に5つ抽出した(Table2)。すべてのH/Lに共通して、高次の振動モードでも有効質量比が大きいものがあることから、通常の重層構造

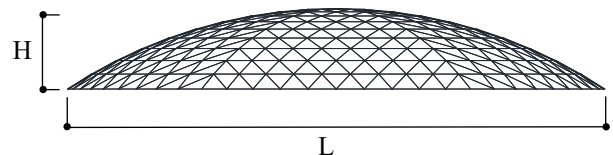


Figure 1. Model Diagram
Table1. Component Properties

	H/L		
	0.1	0.15	0.25
基本部材長 ℓ_0 [mm]	5131.95	5294.08	5793.85
部材細長比 λ_0 [mm]	60		
管径 d_0 [mm]	241.92	249.57	273.12
管厚 t [mm]	6.00		
断面積 A[mm ²]	4560.13	4704.19	5148.28
断面二次モーメント I[mm ⁴]	3.34×10 ⁷	3.66×10 ⁷	4.80×10 ⁷
ヤング係数 E[N/mm ²]	2.05×10 ⁵		

1: 日大理工・学部・建築 2: 日大理工・院(前)・建築 3: 日大短大・教員・建築 4: 日大理工・教員・建築

の振動特性と異なり、高次で卓越モードが発生することが考えられる。

Table3 に H/L=0.25 のモデルの固有値解析結果を示す。断面積5倍モデルでは基本モデルと比較して主要5モードの有効質量比の合計が大きくなっている。H/L=0.1, 0.15 のモデルにおいても同様の結果が得られたことから、本研究のモデルでは、面外剛性を高くすることによって主要な振動モードを限定させることができると考えられる。部材断面積の増加は安全率の増加につながるため、安全率を高く設定することは、固定荷重に対する余裕度が増すだけでなく、ドームの振動を単純化することにもつながると考えられる。

Figure 2 に H/L=0.25 のモデルについて、部材断面積を変化させた場合の固有モード図を示す。基本モデルではドームが水平方向にスウェイするモードが多いのに対して、面外剛性が高くなると、有効質量比が比較的高くなり、面外変形が主となるモードが発生する。また、本研究の解析結果を既往研究³⁾の結果と比較すると、有効質量比の増加に関しては同様の傾向がみられるものの、モード形状

に関しては差異があり、今後境界条件やテンションリングの剛性にも着目して検討したいと考えている。

4. まとめ

本研究では、単層ラチスドームの長期安全率と面外剛性に着目し、部材断面性能の変化が単層ラチスドームの固有振動モードに与える影響を確認した。なお、今回の検討はドーム部のみの限られた条件での評価となっている。大規模な空間構造の場合、屋根構造の応答性状は下部構造の増幅特性の影響を受けやすいことから、今後は下部構造も含めた固有値解析や地震波を入力した時刻歴応答解析による地震応答性状の検討、長期安全率との関係性の詳細把握を行う予定である。

5. 参考文献

- [1] 社団法人日本建築学会：「空間構造の耐震設計と設計例」, pp.19-64, 2001年
- [2] 社団法人日本建築学会：「ラチスシェルの座屈と耐力」, pp.218-227, 2010年
- [3] 竹内徹ら：「応答スペクトル法による中規模ラチスドームの地震応答評価」, 日本建築学会構造系論文集, 第579号, pp.71-78, 2004年5月

Table2. Eigenvalue Analysis Results

H/L								
0.1			0.15			0.25		
次数	周期	有効質量比	次数	周期	有効質量比	次数	周期	有効質量比
	T	Mx		T	Mx		T	Mx
273	0.129	0.625	273	0.128	0.492	2	0.402	0.377
275	0.088	0.055	32	0.428	0.064	273	0.124	0.207
292	0.050	0.044	14	0.478	0.059	276	0.100	0.058
286	0.057	0.041	1	0.533	0.058	5	0.361	0.058
8	0.682	0.037	276	0.091	0.055	29	0.319	0.040

Table3. Eigenvalue Analysis Results (H/L=0.25Model)

断面積 1倍			断面積 2倍			断面積 5倍		
次数	周期	有効質量比	次数	周期	有効質量比	次数	周期	有効質量比
	T	Mx		T	Mx		T	Mx
2	0.403	0.389	2	0.28	0.413	2	0.167	0.423
273	0.124	0.212	163	0.087	0.164	55	0.055	0.195
5	0.363	0.067	3	0.245	0.098	6	0.136	0.109
276	0.100	0.058	251	0.07	0.059	19	0.103	0.044
13	0.351	0.042	14	0.225	0.037	154	0.027	0.032
計		0.768	計		0.770	計		0.803

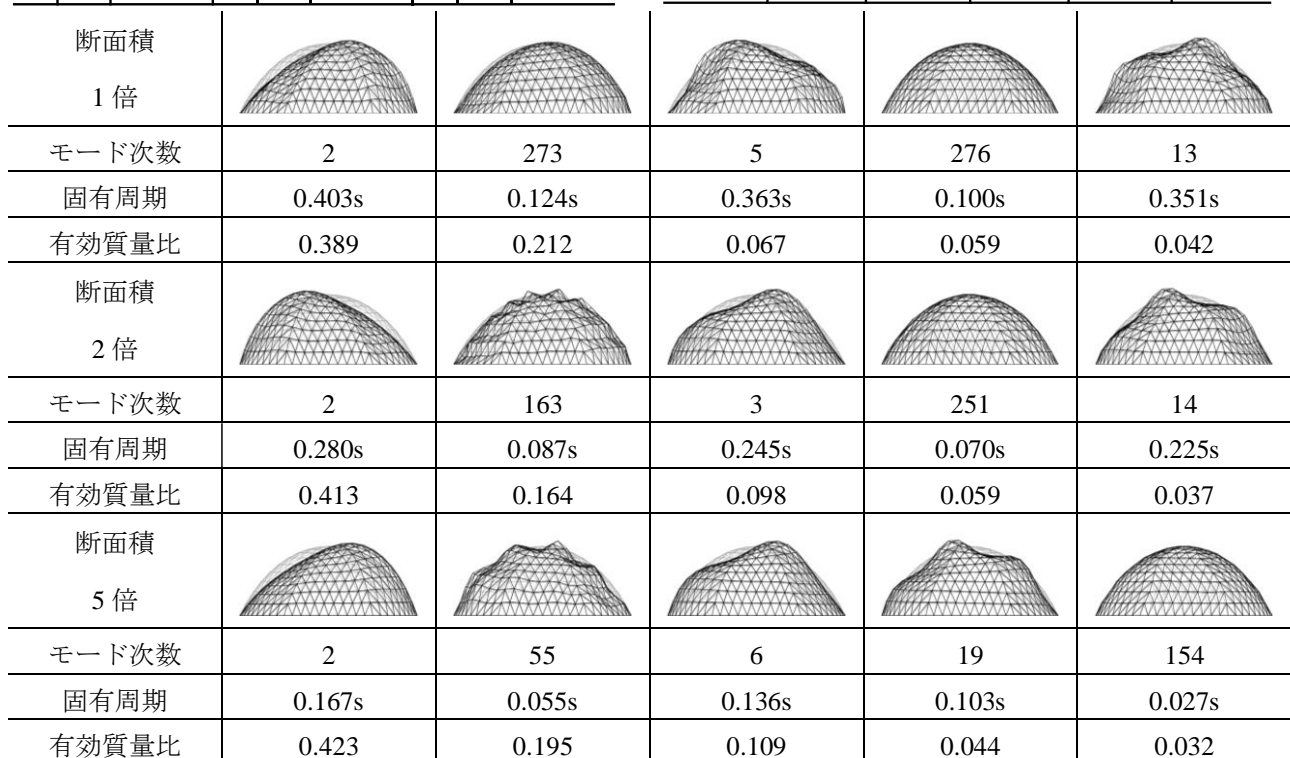


Figure 2. Dominant Eigenmode