入力低減型支持機構を有する大スパンドーム構造物の地震応答性状

下部構造の不均質性が応答に与える影響

DYNAMIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF DOMES WITH
LARGE SPAN IMPLEMENTED BY HYSTERESIS DAMPERS
FOR EARTHQUAKE ISOLATION

Effects of non-uniform vibration characteristics of substructure on the responses

加藤 史郎*, 中澤 祥二**, 打越 瑞昌***, 向山 洋一****

Shiro KATO, Shoji NAKAZAWA, Mizuaki UCHIKOSHI
and Yoichi MUKAIYAMA

The present paper discusses the dynamic responses of a reticular dome which is installed hysteresis dampers between the dome and its substructure. The emphasis is put on the effects of the rigidity and mass distribution of the substructure, being deemed to give much influences on the response of the dome. The investigation based on the earthquake response analysis reveals the following four results. The first is that, along with the increment of rigidities and masses of the substructure, the response of the substructure grows with slight increase of dome response. The second is that the non-uniformness of the mass distribution within the substructure stimulates oval deformations to the substructure, followed by an increase of axial forces and bending moments of the ring girders of the substructure, but, within acceptable limit for design again by applying hysteresis dampers to the substructure itself. The third is that in spite of the large mass and large rigidity of the substructure and irrespective of the non-uniformness of mass distribution the dome response can be much reduced by means of the hysteresis dampers and the final result is that the present structural system can lead domes with such devices to be bearable against severe earthquake motions.

Keywords : *reticular dome, seismic isolation, hysteresis dampers, earthquake response*

ラチスドーム, 免震, 履歴ダンパー, 地震応答

1. 序

1995年の兵庫県南部地震における空間構造物の被害としては, 大空間構造物の支持条件に関連した被害や天井パネルやその他の設備等の落下の被害が報告されている^{1),2)}. 何点かで支持された構造では, 支持点に応力が集中する. 異種の構造に支持された構造では, 支持構造の動特性の影響を受けることがその後の研究³⁾⁻⁶⁾で明らかにされつつある. 石川, 加藤ら^{3),4)}は, 動特性の異なる2本の柱に支持されたトラス構造物の地震応答解析から, 下部構造の変位差により上部トラス構造に大きな付加軸力が発生することを示している. これに対して, この付加軸力を低減するためには, 上部構造と下部構造の中間層に積層ゴムや履歴ダンパー等の入力低減型支持機構を導入することが有効であると考えられる.

入力低減型支持機構を有する空間構造物の地震応答性状に関する既往の研究としては, 上下動に対する偏平シェルの免震の可能性を数値解析および振動実験から検討した新宮らの免震シェルに関する一連の研究^{7),8)}や水平地震入力に対するラチスドームの免震化に関する加藤らの研究^{9),10)}が挙げられる. 加藤らの研究では, 図1.aに示すような上部構造(ラチスドーム), 免震層および下部構造からなる構造物を対象とし, 免震層に入力低減型支持機構を導入することにより上部ドームへの地震入力を低減することが可能であることを示している. 特に, 水平地震動に対して, 免震層の降伏層せん断力係数の大小がドームの地震応答の低減に与える影響を検討してい

る. しかしながら, 既往の研究では, 1)下部構造と上部構造の重量比が免震効果に与える影響, 2)下部構造の動特性に不均一性がある場合の上部構造への影響, さらには, 3)水平・上下地震動を同時に作用させた場合の上部ドーム構造の地震応答性状, についての検討はなされていない.

そこで, 本研究では, 2)に焦点をあて, 既往の研究^{9),10)}で対象とした中間層¹¹⁾に免震層を有するラチスドームに対して, 下部構造と上部構造の重量比や下部構造の動特性の不均一性が上部ドーム構造の地震応答性状に与える影響を検討する.

2. 解析モデル

2.1 構造の全体形状

解析対象は, 図1.aに示すように鉄骨ラチスドーム, 中間層(履歴型の入力低減型支持機構, 以後, 免震層と呼ぶ)および下部構造(支持構造)から構成されるものとする. このモデルは, 先に検討した構造形状⁹⁾と同一である. ドームを構成する部材は, 表1に示す剛性を有し, その接合条件は剛接合とする. ドームの固定荷重は, 単位表面積当たりの質量を 350kg/m^2 と仮定し, テンションリングを除くドームの質量 M_d は $2.486 \times 10^7\text{kg}$ とした. また, 境界条件を周辺ピン支持としたときのドーム単体の1次固有周期は 0.979sec である.

* 豊橋技術科学大学建設工学系 教授・工博

** 豊橋技術科学大学建設工学系 助手・博士(工学)

*** 久米設計 工修

**** バコーポレーション 博士(工学)

Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Toyohashi University of Technology, Dr. Eng.

Research Assoc., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Toyohashi University of Technology, Dr. Eng.

Kume Sekkei, M. Eng.

Tomoe Corporation, Dr. Eng.

表1 ドーム構成部材の材料諸元

部材	ヤング係数 E (GPa)	断面積 A (m ²)	断面二次モーメント I (m ⁴)
ドーム一般部材	206.0	6.000×10^{-2}	2.186×10^{-1}
テンションリング	206.0	5.000×10^{-1}	1.822

2.2 仮定する入力低減支持機構（免震層）

免震層は、図1.aに示すようにドームの外周節点の直下に下部構造の柱を設け、ドーム節点と柱頭の間に設置した60個の免震デバイスから構成されるものとする。各々の免震デバイスは、水平2方向のせん断力を同時に受けるので、モデル化にはMSSモデル¹²⁾を採用する。1つの免震デバイスは8本の弾塑性せん断バネから構成される。弾塑性バネは2次勾配（初期剛性の1/10）を有するパイリニア型とする。各免震デバイスは水平力によるせん断変形を生じるものとし、上下方向の剛性は無限大であると仮定する。免震デバイス1個の復元力特性を図1.bに示す。水平方向の免震層全体の初期剛性 K_0 は次式から得られる免震層の初期固有周期 T_0 を用いて表す。

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{M_d + M_t}{K_0}} \quad (1)$$

ここで、 M_t はテンションリングの質量（ 2.882×10^6 kg）、 g は重力加速度（ 980 cm/sec^2 ）である。本研究では $T_0 = 1.0 \text{ sec}$ と設定し数値解析を進める。降伏層せん断力係数 α_y は解析パラメータとする。 α_y は免震層全体の降伏せん断力 Σq_y を用いて、次式で与えられる。

$$\alpha_y = \frac{\Sigma q_y}{(M_d + M_t)g} \quad (2)$$

本報では、 α_y を0.1, 0.15, 0.2と変化させ、水平地震動に対する水平方向免震がドームにどのような影響をもたらすかを分析する。また、比較のために免震層を剛体としたモデル（以後、非免震と呼ぶ）についても数値計算を進める。

図1.b 免震デバイス1個の復元力特性

図2 下部構造のせん断剛性および質量の概略図

図3 下部構造の質量および剛性の分布

表2 解析ケース

case	下部構造の 質量・剛性	下部構造の重量・剛性の分布		1次固有周期 T_1 (sec)
		重量	剛性	
1	1倍	均一	均一	1.383
2	3倍	均一	均一	1.272
3	3倍	不均一	均一	1.272
4	3倍	均一	不均一	1.294
5	3倍	不均一	不均一	1.288

2.3 下部の支持構造のモデル化と特性

下部構造は、図1.aに示すように3層からなる弾性のせん断系でモデル化する。各層はそれぞれ60本の円柱から構成されている。下部構造の境界条件はX,Y方向およびZ軸回りの回転のみを自由とする。下部構造の柱とリングガーダー、および免震層とテンションリングの関係はせん断系とする。なお、免震層および下部構造の鉛直方向の振動がドームの応答に与える影響も考えられるが、その影響に関しては今後の課題とする。

1) 下部構造と上部ドームの質量比や 2) 下部構造の動特性の不均一性がドームおよび下部構造の地震応答性状に与える影響を検討するために、既報⁹⁾で対象とした解析モデル（基本モデル）と基本モデルの下部構造の質量と剛性をともに3倍としたモデルの2つを検討する。下部構造の層全体のせん断剛性および質量の概略図を図2に示す。また、下部構造の動特性のばらつきは、下部構造の質量

分布や剛性分布の不均一性で表すものとする。下部構造の質量および剛性の分布は図3に示すように均一な分布と不均一な分布の2つを設定する。質量と剛性の分布は同一とする。本論文で仮定した不均一な分布はX軸に対して対称であり、X方向の地震入力に対しては構造物全体のねじれ振動を励起しない。今回行った解析ケースを表2にまとめておく。case3は下部構造の質量分布が不均一であり、剛性分布が均一なモデルである。case4は下部構造の質量分布が均一で剛性分布が不均一なモデルである。case5は質量、剛性分布とも不均一であるが、下部構造の支持柱の固有周期は均一なモデルである。なお、本報では研究の第一段階として、質量比や質量分布の異なるモデルの応答性状を比較することによりその影響を定性的に分析する。したがって、下部構造の質量分布や下部構造の質量、剛性が3倍としたモデルは明確な物理的意味を持っているわけではなく、既報の解析モデルとの比較対象として設定した。また、ねじれ振動の生ずる可能性のあるモデルについては、一部の検討は、4.7節で検討する。

2.4 用いる入力地震波

既報⁹⁾では、ドームの地震応答解析や構造設計に一般的に用いられる El Centro (1940) 波のNS成分を採用し、水平地動に対する上部構造の免震効果を検討した。本研究では、Kobe NS (神戸海洋気象台) を水平地震動に採用し、20秒間の地震応答解析を行う。この地震波の絶対加速度応答スペクトルを図4に示す。図4に a)境界条件を周辺ピン支持としたときのドーム単体の1次固有周期 T_{1p} 、b)非免震の場合の構造物全体の1次固有周期 T_{1o} 、および c)免震層の固有周期を $T_o=1.0\text{sec}$ とした場合の構造物全体の1次固有周期 T_1 を示す。図4より、 $T_o=1.0\text{sec}$ の免震層を導入することにより、構造物の1次固有周期が長くなることがわかる。

本報の目的は、下部構造の動特性が水平方向の免震がドームや下部構造の応答に与える影響を分析することであるので、入力最大加速度 $A_{\max}$ を 500cm/s^2 とし、水平方向(X方向)のみに地震動を入力した。上下地震動のみが作用する場合の地震応答性状の分析や上下と水平が同時に作用する場合の免震の効果については、先述のように別稿にて議論する予定である。

3. 解析条件および解析手法

振動方程式の誘導、振動方程式のモード分解および刺激係数の定義は文献 9),10)と同じである。以下に概略を示す。

3.1 減衰マトリクスの仮定方法

構造物の減衰マトリクスは、構造物全体の質量および初期剛性マトリクスをドーム、免震層、下部構造に分割し、それぞれの部分に対してレーリー減衰を適用することにより設定する¹⁰⁾。上部ドーム構造の減衰定数は、周辺ピン支持されたドームの1次固有周期 0.979sec と 0.25sec に対してそれぞれ2%を仮定し、下部構造にはcase 1の非免震の場合の構造物全体の1次固有周期 1.089sec と 0.25sec に対してそれぞれ2%を仮定する。免震層には減衰を考慮しないものとする。

3.2 数値解析法

運動方程式の数値積分法には、 $\beta=1/4$ としたNewmark- β 法を採用する。応答解析の刻み時間 Δt は 0.01秒 を採用している。なお、収束計算は行っていない。

図4 絶対加速度応答スペクトル ($A_{\max} = 100\text{cm/s}^2$, Kobe NS)

表3.a 固有振動解析結果 (case 1, 非免震)

モード i	T_i (sec)	h_i (%)	刺激係数		$\beta_{xi} S_{Ax}$ (cm/sec^2)
			β_{xi}	β_{zi}	
1	1.09	2.13	4.36	0.00	736
3	0.89	1.90	0.00	1.74	0
6	0.78	1.77	4.16	0.00	1119
8	0.77	1.77	0.00	4.15	0
12	0.65	1.67	3.02	0.00	1105
18	0.53	1.61	0.00	1.37	0
47	0.26	1.96	1.58	0.00	480
70	0.21	2.25	1.10	0.00	177

表3.b 固有振動解析結果 (case 2, 非免震)

モード i	T_i (sec)	h_i (%)	刺激係数		$\beta_{xi} S_{Ax}$ (cm/sec^2)
			β_{xi}	β_{zi}	
1	1.02	2.05	3.28	0.00	642
3	0.88	1.89	0.00	1.37	0
8	0.75	1.75	0.00	4.20	0
9	0.72	1.72	2.93	0.00	1002
15	0.56	1.60	7.80	0.00	2389
17	0.53	1.61	0.00	1.41	0
27	0.41	1.64	1.14	0.00	384
49	0.28	1.88	2.46	0.00	659
68	0.22	2.16	1.87	0.00	303

図5 モード図 (case2, 免震)

4. 解析結果

4.1 固有振動解析

非免震ドームの XおよびZ方向の刺激係数 β_{xi} 、 β_{zi} が大きなモードの固有周期、モード減衰定数および刺激係数を表3.a,bに示す。ここで、表中の S_{Ax} は Kobe NS波 (最大入力加速度 100cm/s^2) の絶対加速度応答スペクトルの値を示す。表3.a,bより、下部構造の違いにより構造物全体の固有周期や卓越するモードが異なることがわかる。特に、case2の15次モードの $\beta_{xi} \times S_{Ax}$ はきわめて大きな値をとり、X方向の入力に対してこのモードが大きく励起されることが予想できる。

過大な地震入力が免震ドームに作用し、免震層がかなり降伏した場合の振動性状を分析するために、免震層の2次勾配を初期剛性とした構造物の固有振動解析を行う。図5はcase2の X方向の刺激係数

図6.a 稜線AOA'の水平加速度応答の絶対値の最大値 (非免震)

図6.b 稜線AOA'の鉛直加速度応答の絶対値の最大値 (非免震)

図7.a 稜線AOA'の水平加速度応答の絶対値の最大値 (免震)

図7.b 稜線AOA'の鉛直加速度応答の絶対値の最大値 (免震)

が大きなモードの変形図を示している。1次モードは固有周期が3.23秒程度であり、免震層が大きく変形し、上部ドームが剛体的に振動するモードである。27次モードは下部構造が振動するモードである。図4の応答スペクトルを考慮すると、下部構造の応答に対しては27次モードが支配的であると予想される。

4.2 加速度応答

非免震のドームに最大入力加速度 $A_{\max}=500\text{cm/s}^2$ の地震動が作用した場合のドーム稜線A-A'の絶対加速度の最大値分布を図6.a,bに示す。降伏層せん断力係数 $\alpha_y=0.1$ の免震層を有するドームへ地震動を入力した場合の応答結果を図7.a,bに示す。

非免震の場合、下部構造の重量や重量分布により上部ドームの水平および鉛直加速度分布は大きく変化する。これは、固有振動解析結果から、水平地震動によって励起される振動モードが異なることに起因すると考えられる。既報^{9),10)}でも指摘されているように、水平動によるドームの鉛直方向の絶対加速度は水平方向に較べて極めて大きい。

降伏層せん断力係数 $\alpha_y=0.1$ の免震層を導入した場合、ドームの水平と鉛直方向の応答加速度は、下部構造の重量や質量分布に関係なく大きく低減される。特に、水平動によるドームの鉛直方向加速度やcase2からcase5のドームの水平方向加速度は、免震層の導入によって大きく低減されている。しかしながら、下部構造の水平加速度は免震層を導入することにより増加する傾向にある。特に、重量や剛性分布が不均一な下部構造を有する構造物に免震層を導入した場合、下部構造の応答加速度の最大値は、case3では重量の大きな側(A)で、case4では剛性の小さな側(A')で極めて大きな値を示している。下部構造の均一、不均一にかかわらず水平加速度応答が大きくなるのは、図5の27次モードのような下部構造が主に振動し、0.4秒程度の固有周期を持つ振動モードが入力地震波によって励起させられたためと考えられる。したがって、下部構造の応答は地震波の周波数特性にも大きく影響されることが考えられる。

4.3 ドーム内の最大軸力、テンションリング軸力の応答

水平動のみを入力した場合、ドームを構成する部材の中では稜線AOA'に隣接する円周方向材に大きな軸力が作用する。稜線AOA'に隣接する円周方向材の最大軸力を図8.a,bに示す。ただし、最大入力加速度 $A_{\max}$ は 500cm/s^2 である。図8.a,b中の固定荷重は、case1に固定荷重を作用させた場合の稜線部材の最大軸力分布を示している。非免震の場合、ドームの応答加速度と同様に、上部ドームの最大軸力は下部構造の重量や重量分布により大きく変化する。免震層を導入することにより、下部構造の質量や質量分布に関係なくドームの最大軸力応答は大きく低減される。

降伏層せん断力係数 α_y を変化させた場合のcase2の稜線AOA'に隣接する円周方向材の最大軸力を図9に示す。 α_y の低減にともない、ドームの最大軸力は低減する傾向にある。 α_y 値にかかわらず、免震層を導入することによりドームの部材に作用する最大軸力も大幅に低減できる。

ドームのテンションリングおよび下部構造のリング材の最大軸力応答と最大曲げモーメントをそれぞれ表4.a,bに示す。質量分布が均一な場合、免震層を導入することによりドームのテンションリングや下部構造のリング材に発生する軸力や曲げモーメントの最大値を低減することができる。一方、質量分布が不均一な場合、免震層を

図8.a ドームの最大軸力分布 (非免震, $A_{\max}=500\text{cm/s}^2$) 図8.b ドームの最大軸力分布 (免震, $\alpha_y=0.1$, $A_{\max}=500\text{cm/s}^2$) 図9 ドームの最大軸力分布と α_y の関係 ($A_{\max}=500\text{cm/s}^2$, case 2)

導入することにより上部構造による下部構造の拘束が弱められる。その結果、下部構造の柱は不均一に振動し、下部のリング材に比較的大きな軸力や曲げモーメントが発生する。

4.4 層せん断力係数

最大入力加速度 $A_{\max}=500\text{cm/s}^2$ の場合の各層の層せん断力係数を図10に示す。図10では非免震の結果と $\alpha_y=0.1$ の免震層を導入した場合の結果を示す。非免震層の場合、下部構造の重量が大きい case2 の層せん断力係数は case1 に比べ大きくなる。また、下部の質量や剛性の分布が不均一な case3 から case5 の層せん断力係数は均一な case2 に比べ小さな値をとる。

免震層を導入することにより、ドーム第1層や免震層の層せん断力係数は下部構造の重量、重量分布に関係なく大きく低減される。一方、下部構造の層せん断力係数は、免震層に近い層ほど低減されるものの、ドーム第1層の層せん断力係数に比べ下部の重量や重量分布が大きく影響する。特に、下部構造の重量が大きい case2 から case5 の下部第1層の層せん断力係数は、中間層免震を導入しても

表4.a テンションリングの最大軸力 [MN]

解析 ケース	免震層 の有無	ドーム	下部構造		
			第3層	第2層	第1層
1	非免震	20.57	20.57	6.10	1.83
	免震	7.09	0.94	0.36	0.32
2	非免震	23.21	23.21	12.17	5.26
	免震	6.57	9.93	0.75	0.42
3	非免震	22.27	22.27	11.98	5.37
	免震	9.79	21.33	20.00	11.97
4	非免震	25.73	25.73	11.98	7.02
	免震	10.00	2.18	22.72	14.03
5	非免震	22.77	22.77	9.28	3.97
	免震	6.87	2.75	1.71	1.03
固定 荷重時	非免震	14.68	14.68	7.00	2.85
	免震	43.79	3.39	1.63	0.66

表4.b テンションリングの最大曲げモーメント [MN·m]

解析 ケース	免震層 の有無	ドーム	下部構造		
			第3層	第2層	第1層
1	非免震	10.83	10.83	4.14	1.85
	免震	2.90	0.57	0.37	0.30
2	非免震	19.70	19.70	8.44	3.62
	免震	3.02	0.35	0.28	0.21
3	非免震	17.34	17.34	9.74	4.99
	免震	4.09	78.35	62.01	31.93
4	非免震	17.57	17.57	12.00	8.23
	免震	4.53	81.59	69.49	37.92
5	非免震	19.85	19.85	9.59	4.28
	免震	3.00	2.67	2.19	1.14
固定 荷重時	非免震	7.89	7.89	2.70	1.03
	免震	9.48	0.56	0.27	0.11

図10 層せん断力係数の分布 ($\alpha_y=0.1$)

0.6~1.0と大きなままである。下部構造の層せん断力係数はドームや免震層ほど大きく低減はされていない。

免震層の層せん断力係数 α_y を変化した場合の case2 の各層の層せん断力係数を図11に示す。 α_y を小さくすると、ドーム第1層の層せん断力係数は減少し、下部構造の層せん断力係数は増加する傾向がある。しかしながら、 α_y の変化によって、ドーム、下部構造とも、層せん断力係数の大きな変化は見られない。

図11 層せん断力係数の分布 (case 2)

図12 層せん断力係数と減衰定数の関係 (case2, $\alpha_y=0.1$)

図10,11より、下部構造の重量が上部ドーム構造に較べ比較的大きい場合、中間層免震によって下部構造の層せん断力係数を大きく低減させることはかなり困難であると想定される。そこで、実際の設計では、1)下部構造の塑性化をある程度許容することや2)下部構造になんらかの制振デバイスを導入することにより、下部構造の減衰定数を増加させるような設計が想定される。本研究では、下部構造の塑性化による履歴吸収エネルギーや導入される制振デバイスの付加減衰効果を下部構造の減衰定数の増加として捉える。図12に下部構造の減衰定数 h を変化させた場合のcase2の各層の層せん断力係数を示す。下部構造の減衰定数を増加させてもドームや免震層の層せん断力係数はほとんど変化しない。下部の層せん断力係数は $h \leq 10\% \sim 15\%$ の領域では h の増加に伴い急激に減少し、 h が大きな領域では h の増加に伴い徐々に減少する傾向がある。

4.5 エネルギーの時刻歴

$\alpha_y=0.1$ の免震層を有するドームへ $A_{\max}=500\text{cm/s}^2$ の水平動が作用した場合のcase1の総地震入力エネルギー W_I の時刻歴を図13.aに示す。ここで、 E は振動エネルギー、 W_h^L 、 W_h^D は下部構造およびドームの粘性減衰による吸収エネルギーをそれぞれ表す。 W_p は免震層の履歴吸収エネルギーを表す。case2,case3の場合の各エネルギーの時刻歴を図13.b,cにそれぞれ示す。図13.a,b,cより、下部構造の重量が大きいcase2は下部構造の粘性減衰による吸収エネルギーの比率がcase1に比べ大きくになっている。また、case3では、下部構造

図13.a 各エネルギーの時刻歴 (case 1, $\alpha_y=0.1$, $A_{\max}=500\text{cm/s}^2$) 図13.b 各エネルギーの時刻歴 (case 2, $\alpha_y=0.1$, $A_{\max}=500\text{cm/s}^2$) 図13.c 各エネルギーの時刻歴 (case 3, $\alpha_y=0.1$, $A_{\max}=500\text{cm/s}^2$)

の質量分布の不均一性によって下部構造のオバリング振動が励起されるため、下部構造の粘性減衰による吸収エネルギーの比率が更に大きくなっている。

4.6 免震層の層間変形

$A_{\max}=500\text{cm/s}^2$ の水平動のみを入力した場合、免震層の層間変形の最大値の分布を図14に示す。下部構造の質量分布が均一な場合、各免震要素のX方向の層間変形はほぼ一様であり、case1で約17cm、case2で約14cmとなる。一方、下部構造の質量分布が不均一な場合、各免震要素のY方向の層間変形が励起され、X方向の層間変形にもばらつきが生じる。

表5に総入力エネルギーの速度換算値(等価速度) V_e 、免震層の平均層間変形 $\overline{\delta_{\max}}$ 、地震の総入力エネルギーに対して免震層の履歴吸収エネルギーが占める割合 W_p/W_I 、および η/μ の値を示す。本報では、免震層の平均最大層間変形 $\overline{\delta_{\max}}$ 、平均塑性変形倍

図14 免震層の層間変形 ($A_{\max}=500\text{cm/s}^2$, $\alpha_y=0.10$)表5 μ , η の値 ($A_{\max}=500\text{cm/s}^2$)

case	α_y	V_e (cm/s)	W_p/W_I (%)	$\bar{\delta}_{\max}$ (cm)	μ	η	η/μ
1	0.10	131.7	71.4	14.59	4.876	25.91	5.31
	0.15	138.7	68.3	14.66	2.936	12.21	4.16
	0.20	140.9	66.2	15.60	2.141	6.859	3.20
2	0.10	125.1	56.7	12.24	3.928	35.59	9.06
	0.15	132.0	56.4	12.92	2.469	17.42	7.06
	0.20	138.9	54.7	13.54	1.726	10.51	6.09
3	0.10	147.7	49.2	15.66	5.308	42.85	9.20
	0.15	150.1	51.4	13.94	2.748	20.56	7.50
	0.20	153.1	51.0	13.33	1.683	11.92	7.08
4	0.10	148.2	53.0	15.60	6.282	46.42	7.39
	0.15	150.6	53.9	13.84	2.715	21.68	7.98
	0.20	152.7	53.0	13.48	1.714	12.34	7.20
5	0.10	125.9	55.3	11.80	4.754	34.94	7.35
	0.15	132.6	54.9	12.50	2.356	17.10	7.26
	0.20	139.2	53.3	13.41	1.699	10.29	6.05

率 μ および平均累積塑性変形倍率 η を文献(13),(9)に従い、次のように定義する。

$$\bar{\delta}_{\max} = \frac{|\bar{\delta}_{\max}^+| + |\bar{\delta}_{\max}^-|}{2} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{W_p}{2 s_y Q_y \delta_y}, \quad \mu = \frac{\bar{\delta}_{\max}}{\delta_y} - 1 \quad (4), (5)$$

ここで、 $|\bar{\delta}_{\max}^+|$, $|\bar{\delta}_{\max}^-|$ はそれぞれ各免震要素の正、負方向の最大層間変形の絶対値の平均を表す。 $s_y Q_y$, W_p は免震層全体の降伏層せん断力、免震層の履歴吸収エネルギーをそれぞれ表す。

表5より、 V_e 値は、層せん断力係数 α_y や下部構造の重量によって若干変化するものの、概ね等しい値をとることが確認できる¹³⁾。地震動の総入力エネルギーに対して免震層の履歴吸収エネルギーの占める割合 W_p/W_I は、1)入力地震動や最大入力加速度、2)免震層の降伏層せん断力係数、3)ドームと下部構造の重量比や下部構造の重量や剛性分布、などの要因によって変化すると考えられる。 $A_{\max}=500\text{cm/s}^2$ の水平動が本報で対象としたモデルに作用した場合、 W_p/W_I は概ね0.7から0.5の値となる。 W_p/W_I は免震層の降伏層せん断力係数 α_y が大きくなるほど小さくなる傾向があるものの、 α_y が0.1から0.2の範囲では概ね一定である。

図15.a 稜線COC'の絶対加速度応答の最大値分布 (case3, 非免震)

図15.b 稜線COC'の絶対加速度応答の最大値分布 (case3, 免震)

図16 ドームの最大軸力分布 (case 3)

μ および η の値は、降伏層せん断力係数 α_y が小さいほど大きな値となる。本研究の解析モデルにおいて、case2の $\alpha_y=0.20$ の場合をのぞき、 η/μ の値は4以上の値となった。 η/μ は地震波の性質による影響が大きい、本研究の解析モデルの η/μ は秋山らの既往の研究^{13),14)}と概ね一致しており、中間層に免震層を有するドームの挙動は、最下層に免震層を有する中高層建物の挙動とほぼ同様の性質を有することを示唆している。

4.7 Y方向の地震入力に対する検討

下部構造の重量が不均一なcase3にY方向の地震入力を行った場合、下部構造のねじれ振動が励起され、免震層の層間変形や下部構造の応答が増大することが想定される。そこで、部分的な検討はあるが、case3に対してY方向に地震入力を行った場合の検討結果を以下に示す。Y方向に $A_{\max}=500\text{cm/s}^2$ の地震入力を行った場合のCOC'の絶対加速度の絶対値の最大値分布を図15.a,bに示す。非免震の場合、X方向入力と同様にドームの鉛直方向の加速度が励起さ

れ、最大で 3500cm/s^2 程度の値となる。また、下部構造のねじれによって、X方向の加速度が発生している。免震層を導入すると、ドームの鉛直加速度はX方向入力の場合と同程度の値に大きく低減される。下部構造の水平加速度の最大値は、C、C'点でY方向に 1200cm/s^2 程度の値となる。紙面には示していないが、下部構造の水平加速度の最大値は、質量の大きなA点側で大きな値となり、 2000cm/s^2 程度の最大加速度応答が発生していることを確認した。

Y方向に $A_{\max}=500\text{cm/s}^2$ の地震入力を行った場合、COCの円周方向部材の軸力応答の最大値を示す。X方向入力と同様に免震層を導入することにより、下部構造がねじれを伴うような場合であっても、ドームの最大軸力を大きく低減することが可能である。

各免震デバイスの最大層間変形は、Y方向入力ではねじれ振動が励起されるために重量の重い点A付近の免震デバイスで最も大きくなり、 28cm 程度の値となる。しかしながら、Y方向入力による免震デバイスの層間変形はX方向入力と比べ極端に大きくなる結果とはならなかった。

6. 結論

本研究では、中間層に免震層を有するドーム構造に対して、下部構造の重量や下部構造の動特性の不均一性がドームの地震応答に与える影響を検討した。限られた条件下ではあるが、本解析で得られた結論を以下に要約する。

(1) 非免震の場合、下部構造に不均一性があるなしにかかわらず水平地震入力によるドームの応答加速度は、水平方向成分に較べ鉛直成分が大きく励起される。また、下部構造の重量や重量分布により上部ドームの水平および鉛直加速度分布は大きく変化する。これに対して、免震層を導入することにより、ドームの水平・鉛直応答加速度や部材軸力およびドーム第1層の応答層せん断力は下部構造の重量や重量分布に関係なく大幅に低減される。

(2) 免震層を導入することによりドームの応答が低減される一方、下部構造の水平加速度応答は増加する傾向にある。特に、重量や剛性分布が不均一な下部構造を有する構造物に免震層を導入した場合、1)下部構造の水平方向の応答加速度の最大値は極めて大きな値を示すこと、2)下部構造のリング部材に比較的大きな軸力や曲げモーメントが発生すること、3)免震層の最大層間変形がばらつくなどの現象が確認された。したがって、下部構造の動特性による軸力や曲げモーメントおよび免震層の層間変形の増加を設計上考慮する必要がある。

(3) 免震化により下部構造の層せん断力係数は低減できるものの、低減の度合はドーム第1層の層せん断力係数に較べ下部構造の重量や重量分布が大きく影響する。特に、下部構造の重量が大きいモデルの下部第1層の層せん断力係数は、免震化しても1.0程度の値をとる場合もある。

(4) 下部構造の応答を低減するために下部構造になんらかの制振デバイスが導入された場合を想定し、下部構造の減衰定数と下部の層せん断力係数の関係を示した。下部構造の減衰定数を増加させることにより、下部構造の層せん断力係数は大きく低減できることを示した。

(5) 中間層に免震層を有するドームに対して、入力エネルギーや免震層の吸収エネルギーに注目し、分析を行った。下部構造に不均一性があっても前報⁷⁾と同様に免震層で吸収されるエネルギーは、総入力エネルギーに対して50~70%となることを示した。

(6) 下部構造が不均一な場合の免震層の設計では、下部構造の応答応力の増加と免震層の層間変形のばらつきの大きさが重要となる。下部構造の柱やテンションリングの応答応力は、1)下部構造の重量分布や剛性分布、2)テンションリングの剛性、3)入力地震波の周期特性、等に大きく影響されると考えられる。本報では限られた条件での解析結果から下部構造の振動特性が上部構造に与える影響を定性的に分析しているものの、定量的な検討については今後の検討課題である。また、免震ドーム工法の実現のためには設計論的な研究が必要であり、下部構造の不均一性を考慮して免震層の最大層間変形をどの程度にするか、等の設計法に関しては、ケーススタディーを今後進めていく予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会, 阪神・淡路大震災調査報告, 鉄骨造建物/シェル・空間構造/容器構造, 建築編-3, 1997年
- 2) 川口健一ほか: 阪神大震災と空間構造の被害, 第5回「シェル・空間構造」セミナー
- 3) 石川浩一郎, 松本秀信, 小田憲史, 加藤史郎: 剛性の異なる2本の柱で支持された平行弦トラス梁の地震応答性状, 構造工学論文集, pp.465-466, 1997年3月.
- 4) 加藤史郎, 中澤祥二, 石川浩一郎, 岡田良子: 下部構造の振動特性の違いが上部構造および支障部の応答に与える影響, 平成9年度京都大学防災研究所共同研究集会, シェル・空間構造の自然災害時非線形挙動とその抑止対策, pp.1-10, 1997年10月.
- 5) 藤本益美, 小田憲史: 支持フレームの影響を考慮した円筒形2層立体トラス構造の地震応答解析, 計算工学講演会論文集, Vol.2, pp.897-900, 1997年5月.
- 6) 斎藤, 松井徹哉: 下部構造の影響を考慮した円筒スペースフレームの地震応答性状, 平成10年度京都防災研究所共同集会, pp.141-150, 1998年10月.
- 7) 新宮清志, 福島欣哉: 上下動地震を受けるシェル構造物の免震およびファジィ振動制御, 日本機械学会論文集(C編), 第60巻577号, pp.2999-3005, 1994年9月.
- 8) Taro Niki and Kiyoshi Shingu: A Fundamental Experiment on Strain Responses of Base Isolated Shell Structures, THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS, Vol.47, Science Council of Japan, pp.305-312, 1998
- 9) 加藤史郎, 中澤祥二, 打越瑞昌, 大杉文哉, 向山洋一: 入力低減型支持機構を有する大スパンドーム構造物の地震応答性状, 免震層の降伏せん断力係数の影響について, 日本建築学会構造系論文集, No.518, pp.57-64, 1999年4月.
- 10) 加藤史郎, 中澤祥二, 嶺岸孝志, 打越瑞昌: 減衰マトリクスの仮定法が大スパンドームの地震応答性状に与える影響について, レーリー減衰と剛性比例減衰に関する比較・検討, 構造工学論文集, Vol.45B, pp.159-171, 1999年3月.
- 11) 小倉桂治, 高山正春, 辻田修, 木村雄一, 和田章: 中間層免震建物の地震応答, 日本建築学会構造系論文集, NO.516, P.99-104, 1999年2月.
- 12) 和田章, 広瀬景一: 2方向地震動を受ける無限均等ラーメン構造の弾塑性応答性状, 日本建築学会構造系論文集, No.399, 1989年5月.
- 13) 秋山 宏: 建築物の耐震設計, 東京大学出版会.
- 14) 日本建築学会, 免震構造設計指針, 1989年.

(1999年6月10日原稿受理, 2000年1月28日採用決定)