入力低減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

下部構造の剛性と重量の影響について

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

Effect of the stiffness and weights of the support structure

加藤 史郎*, 打越 瑞昌**, 大杉 文哉**, 中澤 祥二***, 向山 洋一****

Shiro KATO, Mizuaki UCHIKOSHI, Fumiya OSUGI,
Shoji NAKAZAWA and Yoichi MUKAIYAMA

The purpose of this paper is to study how the stiffness and weights of the support structure influence the response of the large span dome with seismic isolation system, when it's subjected to horizontal earthquakes. This system is applied to a latticed dome with about 300m span, and dynamic response analyses with various conditions are carried out to make it clear. From the results of the numerical studies, it is confirmed that the seismic isolation system with hysteresis dampers can almost reduce the vertical and horizontal acceleration responses of the dome, independent of the stiffness and weights of the support structure.

Keywords : space frame structure, reticular dome, seismic isolation, hysteresis dampers, vertical responses

空間構造物, ラチスドーム, 免震, 履歴ダンパー, 上下振動応答

§ 1. 序

大スパンドーム構造物については, 多くの研究があるものの^{1)~6)}, 弾塑性地震応答性状や崩壊性状がまだ十分解明されておらず, 一般のビル建築のような弾塑性設計法は確立されていない。したがって, 現段階において大スパンドーム構造物の設計にあたり, 部材の塑性化を許容するのは難しく, 弾性に納めることを設計の目標とすることが多い。

最近, 全天候型の多目的空間の提供などの目的で, ドームに要求される規模もどんどん大きくなってきている。ドームの規模が大きくなると, それにつれてドーム屋根の形成に必要な単位面積当たりの鉄骨重量が増大し, また, ドームを支える下部構造にもそれに見合う剛性と耐力が要求される。このような大スパンドーム構造物を単純に弾性設計するのは不経済である。

そこで, 制振デバイスをドーム本体や下部構造の中に取り入れ, ドーム屋根と下部構造の間に免震装置を設置することにより入力エネルギーを吸収し応答を低減することができれば部材設計する上で有利になると予想される。このような観点から, 制振構造の大スパン構造物への適用も検討されつつある^{7)~11)}。

同様の観点から著者らは, 前報¹²⁾において, ドーム屋根と下部構造の間に免震層を設けたモデルにより, 免震層の降伏層せん断力係

数の影響に着目して, その効果を検証した。その結果, 免震層を導入することにより, ドームの水平応答加速度はもとより, 水平動により励起される鉛直応答加速度を大幅に低減できること, また, それに伴いドームの最大応答軸力や応答層せん断力係数も低減できることを示した。

本研究はこれを受けて, 下部構造の剛性および重量が変化した場合でも免震が有効かどうかを検討することを目的とする。その際, 様々な条件変化に対する免震の有効性を検討するために, 地震波については3波を用いた。非免震の場合の応答は, これらの条件変化に敏感に反応するため, 設定条件によって設計された結果が大きく異なることが予想されるが, 免震層の導入により, 応答は条件変化に対して比較的鈍感になり, 設計された結果は, 設定条件にあまり大きく左右されないことが予想される。

同規模の大スパンドーム構造の免震効果は, この他に, 地盤の条件にも影響されることが考えられる。特に, 免震層の固有周期に近い卓越周期を持つ軟弱地盤上に建設される場合については, 十分な検討が必要である。また, 下部構造が塑性化する場合の免震効果についても検討する必要がある。これらの問題については, 別稿で今後考察を進める予定である。

* 豊橋技術科学大学建設工学系 教授・工博

** 久米設計 工修

*** 豊橋技術科学大学建設工学系 助手・博士(工学)

**** 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.
Kume Sekkei, M. Eng.Research Assoc., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Toyohashi University of Technology, Dr. Eng.
Tomoe Corporation, Dr. Eng.

§ 2. 解析モデル

2.1 全体形状

解析モデルは、図 1 に示すように上部構造、中間層および下部構造から構成されるものとする。このモデルでは上部構造と下部構造は、剛性の低い入力低減支持機構を持つ中間層（以後、免震層）を介して接合されている。上部構造はスパン $L=286.8\text{m}$ 、ライズ $H=45.2\text{m}$ 、曲率半径 $R=250.0\text{m}$ 、半開角 $\phi=35^\circ$ のドームとする。ドームを構成する部材は、表 1 に示す剛性を有するものとし、その接合条件は剛接合とする。ドームの固定荷重は、各節点について支配表面積を求め、単位表面積当たりの重量 350kgf/m^2 を乗じたものとする。テンションリングを除くドームの重量 W_d は、 $24,857\text{tf}$ であり、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。

2.2 仮定する入力低減支持機構(免震層)

免震層は、図 1 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、そのドーム節点と柱頭の間に設置した 60 個の免震ディバイスからなるものとする。各々の免震ディバイスは、水平 2 方向のせん断力を同時に受けるので、そのモデル化には 2 方向せん断力の相互作用を考慮できる MSS モデル¹³⁾を採用する。1 つの免震ディバイスは、水平面に等間隔の角度で向きを変えた 8 本の弾塑性バネからなる。弾塑性バネは、2 次勾配(第 1 勾配の 10%)を持つバイリニア型とした。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。

$$T_0 = \sqrt{\frac{W_d + W_t}{K_0 \cdot g}} \quad (1)$$

ここで、テンションリングの重量 W_t は 2882tf と仮定し、 g は重力加速度($=980\text{cm/sec}^2$)である。本研究では、 $T_0=1.0\text{sec}$ と仮定し、降伏層せん断力 $\alpha y=0.1$ or 0.2 の 2 種を解析パラメータとする。各 αy に対して 1 個の免震ディバイスの静的な履歴特性を図 2 に示す。

2.3 下部構造のモデル化と特性

本研究では、主に下部構造の剛性と重量がドームに及ぼす影響を調べるため、下部構造の重量が 4 種、剛性が 3 種の計 $4 \times 3 = 12$ 種の解析モデルにより解析を進める。解析モデル全体の剛性および重量の関係を図 3、表 2 に示す。下部構造の重量は、M1, M2, M3, M4 の 4 種であり、ハッチで示した M1 が前報¹²⁾の重量と同じものである。M の後の数字は重量比を表すものであり、M3 は M1 に対して 3 倍の重量となる。次に、下部構造の剛性は、R1, R3, R4 の 3 種であり、ハッチで示した R3 が前報の剛性と同じものである。R の後の数字は剛性比を表すものであり、R3 は R1 に対して 3 倍の剛性となる。ただし、同じ R1 モデルでも重量を M1~M4 に増加させた場合、各層の負担する重量も増加するため、M2~M4 の各剛性は、M1 モデルの剛性に対して、各層より上部の重量の増分に比例し増加させるものとする。したがって、免震層を剛体としたモデル(以後、非免震と呼ぶ)の 1 次固有周期は、重量に関係なく各剛性によりほぼ同じ値となる。例えば、M1R1 モデルと M4R1 モデルでは、非免震モデルの 1 次固有周期は、 1.49sec と 1.40sec となる。

各層のリングガーダーは、テンションリングと同一の部材とする。下部構造は X, Y 方向の変位および Z 軸周りの回転のみを自由とし、その他の自由度を拘束することにより下部構造の柱とリングガーダー

図 1 モデル図

表 1 ドームの部材諸元

部材	ヤング係数 $E(\text{tf/cm}^2)$	断面積 $A(\text{cm}^2)$	断面二次モーメント $I(\text{cm}^4)$
ドーム一般部材	2100.0	600.0	2.186×10^7
テンションリング	2100.0	5000.0	1.822×10^8

図 2 免震ディバイス 1 個の復元力特性($T_0=1.0\text{sec}$)

表 2 下部構造の剛性(tf/cm)と重量(tf)

	重量 W	剛性 K_s			
	M1	R1	R3	R4	
3 層	5764	1800	5400	7200	
2 層	8646	2400	7200	9600	
1 層	8646	3000	9000	12000	
	M2	R1	R3	R4	
3 層	11528	2110	6330	8440	
2 層	17292	3221	9663	12884	
1 層	17292	4362	13086	17448	
	M3	R1	R3	R4	
3 層	17292	2419	7257	9676	
2 層	17292	4042	12126	16168	
1 層	25938	5724	17172	22896	
	M4	R1	R3	R4	
3 層	23056	2729	8187	10916	
2 層	34584	4862	14586	19448	
1 層	34584	7086	21258	28344

図 3 モデル集約図

一、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。

2.4 入力地震波

入力地震動としては、El-Centro NS, Taft EW, Kobe EW(神戸海洋気象台)の3波とし、20秒間の地震応答解析を行う。これらの地震波の加速度応答スペクトルを図4に示す。図中に重量がM4のモデルに対する構造物全体の1次固有周期を示す。図4より、 $T_0=1.0\text{sec}$ 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分かる。また、R1の下部構造の剛性が小さいモデルでは、非免震の場合でも1次固有周期が約1.40secと長くなっており、応答も小さくなることが予想される。

本報の目的は、水平地震動に対する水平方向の免震デバイスの効果を分析することであるので、入力最大加速度 $A_{\max}$ を 100, 250, 500, 700gal と変化させ、水平方向(X 方向)のみに入力する。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効果については、別稿にて議論する予定である。

§ 3. 解析方法

3.1 運動方程式

免震層以外の下部構造や上部構造は弾性と仮定すると、構造物全体の運動方程式は次式で表現できる。

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} + \{F(X)\} = -[M]\{\alpha\}\{\ddot{u}_g\} \quad (2)$$

ここで、構造物の自由度を n とする。 $[M]$ 、 $[C]$ はそれぞれ $(n \times n)$ 型の質量、減衰マトリクスを表し、 $[K]$ は免震層以外の剛性マトリクスを表す。 $\{F(X)\}$ は n 次の免震層による復元力ベクトルである。 $[\alpha]$ は $(n \times 3)$ の地震影響マトリクス、 $\{\ddot{u}_g\}$ は 3 次の地動加速度であり、それぞれ次式で表せる。

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3) \quad , \quad \{\ddot{u}_g\} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{gx} \\ \ddot{u}_{gy} \\ \ddot{u}_{gz} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

減衰マトリクスについては、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。ドームと下部構造には周期 1.0sec と 0.25sec にそれぞれ 2% を仮定し、免震層には減衰を考慮しないものとする。したがって、本研究で仮定した減衰マトリクスは非比例型減衰である。また、質量マトリクスの作成において、免震層の質量は全体の質量に対して小さいので無視する。免震層が弾性範囲である場合、式(2)の運動方程式は次式となる。

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K_L]\{X\} = -[M]\{\alpha\}\{\ddot{u}_g\} \quad (5)$$

$$[K_L] = [K] + [K_0] \quad (6)$$

ここで、 $[K_L]$ 、 $[K_0]$ はそれぞれ構造物全体の初期剛性マトリクス、免震層の初期剛性マトリクスを表す。

3.2 刺激係数

いま、 $[M]$ と $[K_L]$ から得られる固有振動モード $\{u_i\}$ を用いて変位ベクトル $\{X\}$ をモード分解することを考える。

図4 加速度応答スペクトル ($A_{\max}=100\text{gal}$, $h=2\%$)

表3 固有振動解析結果 (M4R1, M4R3 モデル)

モデル	モード i	固有周期 (sec)	刺激係数 β_{xi}	$\beta_{xi} S_{Ax}$ (gal)	減衰定数 (%)
非 免 震	M4 R1	1	1.401	9.500	592.8
		5	0.950	-3.064	-850.1
		12	0.699	-1.210	-471.7
	M4 R3	32	0.508	-3.943	-841.4
		1	1.053	4.810	969.7
		6	0.768	7.000	2671.3
		12	0.668	5.107	1905.0
免 震	M4 R1	47	0.321	3.478	1264.4
		1	1.612	8.618	573.1
		5	0.976	-3.655	-931.4
		18	0.738	-3.925	-1534.9
		22	0.659	-2.787	-1014.3
	M4 R3	47	0.423	-2.485	-1060.4
		1	1.317	6.326	526.3
		6	0.895	-3.662	-1141.8
		12	0.686	1.940	746.7
		23	0.529	1.167	259.3
		28	0.521	7.032	1465.5
					1.41

* S_{Ax} は Kobe EW 波のスペクトルとする。

図5 振動モード

$$\{X\} = \sum_{i=1}^m \{u_i\} y_i(t) \quad (7)$$

ただし、 i 次の固有振動モード $\{u_i\}$ は $\{u_i\}^T [M] \{u_i\} = 1$ となるように正規化されているとする。上式を式(5)に代入し、左辺から $\{u_j\}^T$ を掛け、モードの直交性を考慮すると、

$$\ddot{y}_j(t) + \sum_{i=1}^m \{u_j\}^T [C] \{u_i\} \dot{y}_i(t) + \omega_j^2 y_j(t) = -\{\beta_{xj} \beta_{yj} \beta_{zj}\} \ddot{u}_g \quad (8)$$

$$\omega_j^2 = \{u_j\}^T [K_L] \{u_j\} \quad (9)$$

$$\{\beta_{xj} \beta_{yj} \beta_{zj}\} = \{u_j\}^T [M] [\alpha] \quad (10)$$

となる。ここで、 $\beta_{xj}, \beta_{yj}, \beta_{zj}$ はそれぞれ X,Y,Z 方向に地震波を入力した場合の j モードの刺激係数である。減衰マトリクス $[C]$ が比例減衰で仮定された場合、式(8)は次式となる。

$$\ddot{y}_j(t) + 2h_j \omega_j \dot{y}_j(t) + \omega_j^2 y_j(t) = -\beta_{xj} \ddot{u}_{gx} - \beta_{yj} \ddot{u}_{gy} - \beta_{zj} \ddot{u}_{gz} \quad (11)$$

$$h_j = \{u_j\}^T [C] \{u_j\} / 2\omega_j \quad (12)$$

式(11)より、地動 $\ddot{u}_{gx}$ の加速度応答スペクトルを S_{Ax} とすると、X 方向の入力地動 $\ddot{u}_{gx}$ による j モード加速度 $\ddot{y}_j$ の最大値は $\beta_{xj} S_{Ax}$ で与えられる。したがって、式(10)で定義された刺激係数 $\beta_{xj}, \beta_{yj}, \beta_{zj}$ と応答スペクトルの積は X,Y,Z 方向の地震入力に対して j モードがどの程度卓越するかを分析する指標となる。

3.3 運動方程式の数値積分法

式(2)の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 は十分細かくし 0.005 秒を採用している。なお、収束計算は行っていない。

§ 4. 解析結果

4.1 固有振動解析

M4R1, M4R3 モデルに対して、それぞれ非免震と免震の場合の固有周期、刺激係数および減衰定数を表 3 に示す。この表に示した値は、X 方向の刺激係数 β_{xi} に関して、主にその刺激係数大きいモードを抽出したものである。ここで、表 3 中の S_{Ax} は Kobe EW 波 100gal を入力した場合の絶対加速度応答スペクトルの値を示す。

3.1 節で述べたように、仮定した減衰マトリクスは非比例型減衰であるため、式(8)の左辺の第 2 項は対角化されず非対角項も値を有する。したがって、ここでは各モードの減衰定数として、式(12)で計算される対角項のみを表 3 に示している。

非免震モデルおよび免震層の初期剛性のみ考慮した免震モデルの線形弾性応答解析では、水平地震動時には表 3 に示すモードが応答に大きく寄与する。M4R3 モデルの $\beta_{xi} S_{Ax}$ が大きな振動モードのモード図を図 5 に示す。免震モデルのモード図より、1 次モードは免震層が主に振動するモード、6,12 モードはドームが主に振動するモード、28 次モードは下部構造を含め構造物全体が振動するモードであることが分かる。

4.2 応答加速度

応答加速度分布の例として、M4 モデルに Kobe 波 500gal を入力した場合のドーム稜線上の応答加速度最大値を図 6 に示す。図 6 は、上が水平方向、下が鉛直方向の応答加速度を示しており、その値は応答の絶対値の最大値である。

まず、非免震の場合、下部構造の剛性が大きい R3,R4 のモデルは、

図 6 稜線上の応答加速度の絶対値の最大値(Kobe : 500gal)

図 7 下部構造の重量と応答加速度最大値

$A_{max}=500gal$ の入力に対して、水平で約 2000~2500gal の応答を示し、鉛直ではその約 3 倍の 7000gal と極めて大きな応答を示している。これは、前報でも示した結果であるが、水平地震動によって励起される逆対称モードの鉛直成分の影響が大きいこと示している。その逆対称モードは、M4R3 モデルの場合、図 5 に示す 6,12 次モードであり、そのモードの $\beta_{xi} S_{Ax}$ が大きいため、応答も大きくなっているものと考えられる。いっぽう、下部構造の剛性が小さい R1 のモデルは、1 次固有周期が約 1.40sec であり、免震ドームの 1 次固有周期と近いため、R3,R4 のモデルと比較し応答はかなり小さくなっている。この R1 モデルと R3 モデルとの応答差は、 $\beta_{xi} S_{Ax}$ の

図8 入力加速度とドーム部材の最大軸力(Kobe 波)

図10 層せん断力係数分布(500gal)

図9 下部構造の重量とドーム部材の最大軸力

図11 下部構造の重量と層せん断力係数

値からも理解できる。

つぎに、 $\alpha y=0.1$ の免震の場合、ドーム部分の応答の水平成分は約 500~750gal、鉛直成分は約 1000~1800gal であり、非免震に対してかなり応答が低減されている。また、その応答の分布は、下部構造の剛性の変化に対して鈍感であり、比較的ばらつきが小さくなっている。この傾向は、ここでは示していないが、M1~M3 モデルや他の入力地震波に対して共通している。

各地震波 500gal 入力に対して、下部構造の重量とドーム部分の応答加速度最大値の関係を図 7 に示す。この図は、図 6 の稜線上の応答加速度最大値の中で、さらにドーム部分(A-O-A')での最大値を

プロットしたものであり、左側が水平成分、右側が鉛直成分である。非免震モデルの応答は、下部構造の剛性の変化に対して大きくばらつき、下部構造の重量の変化に対しては、重量が大きくなるほど応答加速度も大きくなる傾向にある。また、入力地震波によっても応答の変化が見られる。

しかしながら、免震モデルは、下部構造の剛性および重量の違いに対する応答の変動が小さく、入力地震波の違いに対する応答差も小さくなっている。R3,R4 モデルの場合、その応答加速度の値は、水平成分が約 500gal で鉛直成分が約 1000gal 程度であり、非免震に対して約 1/3~1/7 となっている。したがって、ドームと下部構造

の間に免震要素を導入することにより、ドームの耐震設計は、かなり容易となることが予想される。

4.3 ドーム部材の応答軸力

M4 モデルに Kobe 波を入力した場合のドームの応答軸力最大値を図 8 に示す。横軸は入力加速度とし、縦軸に応答軸力の最大値をプロットしている。図 8 中の上図はドームの一般部材(テンションリング以外のドーム用の部材)の中で応答軸力の最大を示した部材の軸力であり、下図はドームのテンションリングの中で応答軸力の最大を示した部材の軸力である。ただし、非免震のテンションリング軸力は、下部構造のリングガーダーと固定されているため、テンションリングとリングガーダーの両者で発生する応力を示している。図 8 より、下部構造の剛性が大きい R3,R4 の免震モデルは、特に免震層による効果があり、最大軸力の低減度合が大きくなっている。また、それらのモデルは、入力加速度が大きくなるほど免震による低減の効果も大となる。いっぽう、非免震モデルは、500gal の入力に対して、最大軸力が固定荷重時の約 5 倍となる可能性もあり、部材設計は困難となることが予想される。

各地震波 500gal 入力に対して、下部構造の重量とドームの応答軸力最大値の関係を図 9 に示す。左側にドームの一般部材、右側にテンションリングの最大軸力を示している。図 9 より、R3,R4 の免震モデルは、下部構造の重量に関係なく応答軸力の低減が認められ、地震波による応答のばらつきも小さくなっている。しかしながら、下部構造の剛性が小さい R1 の免震モデルは、下部構造の重量が大きくなるほど応答軸力も大きくなっている。これは、ドームの免震化により、下部構造単体の振動が影響しているものと考えられる。R1 モデルにおける下部構造のみの 1 次固有周期は、表 3 の剛性と重量で計算すると、M1 モデルが 0.74sec で、重量が増大するにつれて徐々に大きくなり、M4 モデルで 1.03sec となる。したがって、下部構造の重量が大きくなるほど、下部構造単体の 1 次固有周期がドーム単体の 1 次固有周期に近くなり、ドームの軸力に影響を与えているものと考えられる。

4.4 応答層せん断力

M1,M4 モデルについて、各地震波を 500gal 入力した場合の応答層せん断力係数の最大値を図 10 に示す。図中のドーム第 1 層の層せん断力係数は、図 1 に示すドーム外周部の斜材応力から計算し求めている。実際、このようなドーム構造物に層せん断力という概念はあまり適切ではないが、ドームに入力される水平力の指標として示している。

まず、免震層およびドーム第 1 層の層せん断力係数に注目すると、先に示したドームの応答加速度の結果と同様に、免震モデルの層せん断力係数は、下部構造の剛性や重量に関係なく 0.20~0.25 と小さく一定した値となっている。これに対して非免震の場合は、R1 モデルで 0.5 程度であるが、R3,R4 モデルでは 1.0 を超える層せん断力係数が発生している。

次に、下部構造の層せん断力係数に注目すると、下部構造の剛性が大きい R3,R4 モデルの場合、非免震モデルは、下部構造の上層へ行くほど大きな応答を示している。しかし、免震モデルは、ドームの免震効果により、最下層と同程度もしくはそれより小さくなる傾向を示している。

各地震波 500gal 入力に対して、下部構造の重量と免震層および

図 12 吸収エネルギーの時刻歴(Kobe : 500gal)

図 13 下部構造の重量と総入力エネルギー

下部構造の第 1 層の層せん断力係数の関係を図 11 に示す。この図より、免震モデルに関して、免震層の応答層せん断力係数は、下部構造の重量にあまり影響されていないことが分かる。

しかし、下部構造の第 1 層の応答は、地震波および下部重量の変化に対して大きくばらついている。さらに、重量の変化に対して、R3,R4 モデルは、非免震モデルよりもむしろ免震モデルの方が応答の変化が大きい。これは、下部構造の重量の変化に対する剛性の設定が、非免震モデルの 1 次固有周期に合わせているためであり、免震化による下部構造単体の振動が影響しているものと考えられる。

下部構造の剛性が大きい R3,R4 モデルにおいて、下部構造の第 1 層の応答層せん断力係数は、免震化により低減される傾向にある。しかしながら、500gal 入力に対して 24 ケース中 4 ケースは、非免震より免震モデルの応答が上回っており、注意を要すると考えられる。また、下部構造の第 1 層の応答値を見ると、その値は免震モデルでも 0.8 以上を示している。これは、同規模の一般の建物でも発生する値と考えられるが、下部構造の設計では、何らかの制振装置

図 14 免震デバイス I の $Q-\delta$ 関係(Kobe : 500gal) 図 15 下部構造の重量と $\overline{\delta_{\max}}$ および η/μ

の組み込みが必要であると思われる。

4.5 吸収エネルギー

M4R3モデルにKobe波500galを入力した場合のエネルギー吸収の時刻歴を図12に示す。図中の記号は、それぞれE:振動エネルギー、 W_h^L :下部構造の粘性減衰による吸収エネルギー、 W_h^D :ドームの粘性減衰による吸収エネルギー、 W_p :免震層の履歴吸収エネルギーを表している。免震層の履歴吸収エネルギーは、総入力エネルギーの約6割を示しており、下部構造の粘性減衰による吸収エネルギーと比較してもかなり大きな値となっている。この免震層のエネルギー吸収が、下部構造の応答の低減に寄与しているものと考えられる。

各地震波500gal入力に対して、下部構造の重量と地震総入力エネルギーおよびエネルギーの速度換算値(等価速度) V_e の関係を図13に示す。左側に総入力エネルギー、右側に等価速度 V_e を示している。総入力エネルギーは、下部構造の重量が増えるに従い、全体の重量が増えるため大きくなっている。しかしながら、等価速度 V_e

図 16 下部構造の重量と免震層の吸収エネルギー

は、その重量に関して無次元化されるため、横軸の重量による影響が小さくなり、ほぼ一定となっている。

等価速度 V_e の値は、El Centro, Taft波で約120~180cm/secとなり、Kobe波で約120~220cm/secとなっている。このKobe波で大きくなっているのは、各地震波の入力加速度500galに対する結果を示したためであり、各地震波の速度で同レベルの入力を行えば、Kobeの応答値も小さくなることが考えられる。ちなみに、各地震波500galに対する速度の値は、それぞれ、El-Centro:48.9cm/sec, Taft:50.3cm/sec, Kobe:60.2cm/secである。したがって、各地震波50cm/sec相当の入力に対する等価速度 V_e の値は、地震波や免震、非免震によらずほぼ150cm/sec付近に分布するものと考えられる。

4.6 免震層の挙動

図14にM4R3モデルの免震デバイスI(図1の点A'の直下)のX方向の変形 δx とX方向の復元力 Qx の関係を示す。他の免震デバイスの変形-復元力は、概ね同一の履歴を描いている。図14より、正方向の最大層間変位 $\delta_{\max}^+$ と負方向の最大層間変位 $\delta_{\max}^-$ の絶対値は異なっている。

本報では、平均最大層間変形 $\overline{\delta_{\max}}$ 、平均塑性変形率 μ および平均累積塑性変形率 η を次式のように定義する。

$$\overline{\delta_{\max}} = \frac{|\delta_{\max}^+| + |\delta_{\max}^-|}{2} \quad (13)$$

$$\eta = \frac{W_p}{2s Q_y \delta_y}, \quad \mu = \frac{\overline{\delta_{\max}}}{\delta_y} - 1 \quad (14)$$

ここで、 $|\delta_{\max}^+|$ 、 $|\delta_{\max}^-|$ はそれぞれ各免震要素の正、負方向の最大層間変形の平均値の絶対値を表す。 $s Q_y$ 、 W_p はそれぞれ免震層全体の降伏層せん断力、免震層の塑性吸収エネルギーを表す。

各地震波 500gal 入力に対して、下部構造の重量と平均最大層間変形 $\delta_{\max}$ および η/μ の関係を図 15 に示す。 η/μ の値は、降伏層せん断力係数 $\alpha_y=0.1$ の方が $\alpha_y=0.2$ よりも大きくなる傾向を示している。また、本研究で対象とした解析モデルにおいて、 η/μ の値は、4~8 程度の値を示している。この結果は、秋山らの既往の研究¹⁴⁾と概ね一致しており、中間層に免震層を持つドームの挙動は、最下層に免震層を持つ中高層建物の挙動とほぼ同一の性質があることを示唆している。

下部構造の重量と免震層の吸収エネルギーおよび吸収率の関係を図 16 に示す。左側が免震層の吸収エネルギー、右側がその吸収エネルギーを全体の総入力エネルギーで除した値を示している。免震層の吸収エネルギーは、図 13 の総入力エネルギーと同様に下部構造の重量の増加に伴い大きくなっている。また、降伏層せん断力係数 α_y の違いによる吸収エネルギーの明瞭な差は現れていない。

免震層のエネルギー吸収率に注目すると、免震層の吸収エネルギーは総入力エネルギーの約 50~70%であり、下部構造の重量や入力地震波に対する変動は小さい。したがって、免震層の吸収するエネルギーは、構造物全体への入力エネルギーに影響されるものと考えられる。

§ 5. 結論

本研究では、比較的規模の大きなドーム構造に対して積層ゴムや履歴ダンパー等の入力低減型の機構の導入が有効かどうかについて検討した。本報では特に下部構造の剛性および重量とドームの入力低減の関心に注目して検討を行った。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) 前報と同様に、免震層を導入することにより、ドームの水平加速度はもとより、鉛直加速度応答を大幅に低減できることを示した。また、その効果は、下部構造の剛性および重量に関係なく得られることが確認された。
- 2) ドームの応答軸力に関しても、加速度と同様に低減されるが、下部構造単体の 1 次固有周期がドーム単体の 1 次固有周期と近接する場合、その低減効果は小さくなることがわかった。
- 3) 免震層を導入することにより、ドーム第 1 層の応答層せん断力は、下部構造の剛性、重量に関係なく大きく低減される。また、免震化により、下部構造のエネルギーを吸収し、下部構造の層せん断力も低減される傾向にあるが、 C_0 の値は 0.8 を超える場合もあり、下部構造には何らかの制振が必要である。
- 4) ドーム構造物全体に入力されるエネルギーは、入力地震波の速度で 50cm/sec 相当を入力した場合、免震、非免震にかかわらず等

価速度 V_e でほぼ 150cm/sec 付近に分布していることを示した。

- 5) 免震層で吸収されるエネルギーは、下部構造の重量が増えるほど大きくなるが、総入力エネルギーに対する比は、下部構造の剛性や重量に関係なく約 50~70%となることを示した。

参考文献

- 1) 國枝治郎：上下地震動を受ける球形ドームの応答解析, 京都防災研究所年報, 第 26 号, B-1, pp. 1-11, 1983 年。
- 2) 石川浩一郎, 加藤史郎：上下地震動を受ける二層立体ラチスドームの耐震性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 447, pp. 79-88, 1993 年 5 月。
- 3) 加藤史郎, 庄村昌明, 向山洋一：水平と鉛直地震動を受ける大スパン単層ラチスドームの応答性状と崩壊加速度に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 447, pp. 87-96, 1995 年 11 月。
- 4) 和田 章, 向 秀元：一方向スパン複層円筒トラス構造物の地震応答解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 413, pp. 87-96, 1990 年 7 月。
- 5) 向山洋一：単層ラチスドームの地震応答性状ならびに層せん断力係数に関する研究, 豊橋技術科学大学博士学位論文, 1996。
- 6) 多田元英, 米山隆也：建築物の屋上に設置された 2 層立体トラスの鉛直地震応答性状, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 452, pp. 77-86, 1993 年 10 月。
- 7) 新宮清志, 福島欣哉：上下動を受けるシェル構造物の免震およびファイバ振動制御, 日本機械学会論文集 (C 編), 第 60 巻 577 号, pp. 2999-3005, 1994 年 9 月。
- 8) Kato S., Nakazawa S., Matsue Y., and Yamashita T.: Active Control of Axial Forces in Beam String Space Frames Proceedings of the IASS-ASCE International Symposium 1994, Atlanta, Georgia, USA, pp. 664-673, April, 1994.
- 9) 松榮泰男：張弦材を有するスペースフレームの静的および動的座屈性状に関する検討, 豊橋技術科学大学, 修士学位論文。
- 10) 楠 達明, 髙 松 浩, 山田大彦：TMD による単層ラチスドームの振動制御, 構造工学論文集, Vol. 41. B, pp. 17-22, 1995 年 3 月。
- 11) 加藤史郎, 中澤祥二：張弦梁構造の軸力による多段階軸力制御 半質量ダンパーによる張弦梁構造の制振, 構造工学論文集, Vol. 41. A, pp. 123-132, 1995 年 3 月。
- 12) 加藤史郎, 中澤祥二, 打越瑞昌, 大杉文哉, 向山洋一：入力低減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報告集, No. 518, pp. 57-64, 1999 年 4 月。
- 13) 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報告集, No. 399, 1989 年 5 月。
- 14) 秋山 宏：建築物の耐震設計, 東京大学出版会。

(1999 年 3 月 3 日原稿受理, 1999 年 6 月 25 日採用決定)