高ライズラチスドームの地震層せん断力係数に関する研究

STUDY ON STORY-SHEAR COEFFICIENTS FOR HIGH-RISE LATTICED SPHERICAL DOMES

加藤 史郎*, 向山 洋一**
Shiro KATO and Yoichi MUKAIYAMA

The present paper studies the vibrational characteristics of high-rise latticed spherical domes subjected to horizontal earthquake motions. First, the maximum responses of story-shear forces at various heights in the domes are calculated by elastic linear time-domain analysis adopting three accelerations of ELCENTRO-NS, TAFT-EW and MIYAGI-NS. Secondly, the story-shear forces are summarized as the story-shear coefficients in both the horizontal and vertical directions for the coefficients to be applied in equivalent static analysis for the earthquake forces. The coefficients are expressed by combination of first natural period T_1 , response spectra $S_A(T_1)$ and some other required parameters, representing the dynamic properties of domes. Lastly, the validity of the proposed scheme for static analysis is discussed by comparing the static results with those obtained by time-domain response analysis.

Keywords: latticed dome, earthquake response analysis, story-shear coefficient, acceleration response spectrum

ラチスドーム, 地震応答解析, 層せん断力係数, 加速度応答スペクトル

1. 序

ドーム状構造物の耐震性に関する研究^{1)~12)}の多くは, 比較的偏平なドームを対象として, 主に上下動を取り扱っており, 水平動を取り扱ったものは少ない。ドームの規模が増大するに伴い, 水平地震動も耐震設計に大きな影響を与えることが予想され, 特に, 高ライズのドームに関しては, 水平地震動に対する検討は必須条件となろう。その検討に当たっては, ドームの地震応答性状を各側面にわたって詳細に分析することも必要となるが, ドームの設計手法の確立という面から考えれば, 高層建築で採用されている層せん断力係数 C_i あるいはその分布係数 A_i ¹³⁾が, ドームの形状によってどのような値を取るかを検討することも必要となる。

筆者らはこのような立場から, 前報¹⁴⁾において, 半開角 $\phi=90^\circ$ の単層ラチスドームの地震応答性状について検討を行い, 地震加速度応答スペクトルより層せん断力係数が推定できること, また, それを用いた静的弾塑性解

析からドームの耐力が推定できることを示している。

そこで, 本研究では前報に引き続き, 図-1および表-1に示すように ϕ が $60^\circ \sim 120^\circ$ の範囲の単層ラチスドームを対象とし, 層せん断力係数に焦点を絞り検討を行う。なお, 半開角が $\phi=60^\circ$ より小さいものに関しては, 上下動を含めた検討が必要となるので, 今後の検討課題とする。層せん断力係数の分析に当たっては, 前報と同様にドームの1次固有周期と地震加速度応答スペクトル, 今回はさらに, ドームの半開角 ϕ をパラメータとした関数を用いる。また, 水平地震動を受けるドームに対して, 従来ほとんど分析されていなかった鉛直方向の振動に対する層せん断力係数に対しても検討を行う。

2. 解析モデル

2.1 ドームの全体形状

単層ラチスドームの形状は, 図-1に示す円形平面を

* 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 大学院生・工修
(巴コーポレーション技術開発部)

Prof., Dept. of Architecture and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Technology, Dr. Eng.

Graduate student, Dept. of Architecture and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Technology, M. Eng. (Engineering Development Division Tomoe Corporation)

有する球形である。ドームのスパン L （ドームの最大幅）は、規模を統一させるため全てのモデルで60mとする。ドームのライズ H は、半開角 ϕ をパラメータとし、 $\phi=60^\circ\sim 120^\circ$ を 15° ずつ変化させた5種とする。したがって、ドームの曲率半径 R は $\phi=60^\circ$ で最大の34.64mとなり、 $\phi\geq 90^\circ$ の場合は30.00mとなる。ドームの形状例として、 $\phi=60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ のドームを図-1に示す。各ドームの半開角 ϕ に対する形状諸元を表-1に示す。表中の l_0 はドームを構成する部材長さの平均値であり、 $l_{\max}$ および $l_{\min}$ は、それぞれ部材長さの最大値と最小値である。また、ドームは全体が1種類の部材で構成されているものとする。

各層の Z 座標は、緯度方向に角度で等分することによって定められ、 $\phi=60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ では12等分、 $\phi=105^\circ, 120^\circ$ はそれぞれ14, 16等分されている。各層における節点の X, Y 座標は、平面内で経度の方向に角度で $8\sim 32$ 等分することによって定められている。

なお、効率的にパラメトリックな数値解析を実行するため、力学的性状に関して X 軸についての対称性を仮定し、図-1に示す1/2領域を解析する。

2.2 部材モデル

単層ラチスドームを構成する部材は、図-2に示すようにばねと梁から成るものとし、ねじり剛性は無視し得るものとする。解析に用いる部材断面は鋼管を仮定し、その部材諸元を表-2に示す。表中の λ_0 は各ドームの平均部材長さ l_0 に対する部材細長比である。部材端の回転ばね定数 K_B （ただし、 $K_{By}=K_{Bz}=K_B$ とする）は剛接

図-1 ドーム形状図

表-1 ドーム形状諸元

	L (m)	H (m)	H/L	l_0 (m)	$l_{\max}$ (m)	$l_{\min}$ (m)
$\phi = 60^\circ$	60.00	17.32	0.29	3.80	5.88	2.31
$\phi = 75^\circ$	60.00	23.02	0.38	4.13	5.88	2.57
$\phi = 90^\circ$	60.00	30.00	0.50	4.61	5.88	2.94
$\phi = 105^\circ$	60.00	37.76	0.63	4.70	5.88	2.94
$\phi = 120^\circ$	60.00	45.00	0.75	4.74	5.88	2.94

A: 断面積, I_p : 断面2次モーメント
E: ヤング係数 ($=2100 \text{ ttf/cm}^2$)
 K_{by}, K_{bz} : Y軸, Z軸回り回転ばね定数
 l : 部材長さ

図-2 部材モデル

表-2 部材諸元

部材サイズ	$A(\text{cm}^2)$	$I_p(\text{cm}^4)$	λ_0				
			$\phi = 60^\circ$	$\phi = 75^\circ$	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 105^\circ$	$\phi = 120^\circ$
P-114.3x3.5	12.18	187.0	97	105	118	120	121
P-165.2x4.5	22.72	734.0	67	73	81	83	83
P-216.3x5.8	38.36	2130.0	51	55	62	63	64

合を仮定し、式(1)で示す無次元回転ばね定数 κ の値で1000とする。

$$\kappa = K_{By} \cdot (l_0 / E I_p) = K_{Bz} \cdot (l_0 / E I_p) \quad (1)$$

2.3 ドームの自重および境界条件

ドームの自重 w は単位表面積当たり100, 200, 300kgf/m²の3種とし、各節点の荷重負担面積より計算される重量から集中質量として与える。

境界条件は、ドームの底部各節点を固定支持とする。

2.4 入力地震加速度波形

入力地震加速度は、ELCENTRO-NS(1940), TAFT-EW(1952)とMIYAGI(TOHHOKU UNIV.)-NSの3波とし、入力加速度の最大値 A_{max} を100galとする。入力波に対する加速度応答スペクトル S_A を図-3に示す。図中、塗り潰した部分は、本解析で用いたドームの1次固有周期 T_1 の範囲である。

以上、4つのパラメータ(ドームの半開角 ϕ 、部材サイズ、自重 w 、入力地震波)の組合せによる135(=5×3×3×3)ケースに対して解析を行う。

3. 解析方法

本研究では、ドームの層せん断力係数 C_i 分布を求めるため、線形地震応答解析を行う。応答解析法は、ニューマークの β 法とし、 β の値は1/4(平均加速度法)とする。減衰は剛性比例型とし、その定数の値は1次固有周期に対して2%とする。入力波の継続時間は、ELCENTRO, TAFTで10秒、MIYAGIで20秒とする。また、時間刻み Δt は、ELCENTRO, TAFTで0.01秒とし、MIYAGIでは計算時間の短縮のため0.02秒とする。

本解析において、地震荷重は図-4に示すようにX方向に加振するものとし、層せん断力係数はX方向の水平成分とZ方向の鉛直成分に分けて検討を行う。先ず水平成分の層せん断力係数 C_{Hi} は、X方向の加速度から求めるものとする。すなわち、 i 層の層せん断力係数 C_{Hi} は、 i 層より上部の質点の加速度に質量を乗じ、それらを合計したものを i 層より上部の重量で除した値とする。また、その値は時刻歴応答での最大値とする。次に鉛直成分の層せん断力係数 C_{Vi} は、Z方向の加速度から求めるものとするが、X方向と同様に単に加速度と質量を乗じ合計した場合、Y軸に対称な節点同士で相殺されるため、 $X < 0$ と $X > 0$ の領域に分割し、別々に求める。

4. 解析結果

4.1 ドームの1次固有周期 T_1

自重 $w=100\text{kgf/m}^2$ に対する各ドームの1次固有周期 T_1 の値を表-3に示す。 $w=200, 300\text{kgf/m}^2$ に対する T_1

図-3 加速度応答スペクトル

図-4 ドームに作用する静的荷重

表-3 ドームの1次固有周期 T_1 (sec)

部 材 サ イ ズ	$w=100\text{kgf/m}^2$				
	$\phi = 60^\circ$	$\phi = 75^\circ$	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 105^\circ$	$\phi = 120^\circ$
P-114. 3x3.5	0.280	0.329	0.434	0.591	0.845
P-165. 2x4.5	0.205	0.240	0.317	0.432	0.617
P-216. 3x5.8	0.157	0.184	0.243	0.331	0.473

は、 $w=100\text{kgf/m}^2$ に対する値をそれぞれ $\sqrt{2}$ もしくは $\sqrt{3}$ 倍した値である。したがって、本解析で用いるドームの T_1 の範囲は、 $0.157\sim 1.464\text{sec}$ である。

各1次固有周期 T_1 に対する固有モードは、ほとんどのモデルで水平方向の振動モードを示したが、ドームの半開角 $\phi=60^\circ$ 、部材サイズP-114のモデルのみ上下方向の振動モードを示した。したがって、 $\phi=60^\circ$ 、P-114のモデルに対しては、各モードにおける水平方向（X方向）の刺激係数を求めその値の最も大きい8次の固有周期を T_1 とする。その固有周期と刺激係数の関係を表-4に示す。ドームの半開角 $\phi=60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ で部材サイズP-114のモデルに対する1次の固有モードを、図-5に示す。このモード図より、 $\phi=90^\circ$ のドームはZ方向の変形をほとんど示していないのに対して、 $\phi=60^\circ, 120^\circ$ のドームはX方向の変形と同時にZ方向にも変形しているのが分かる。また、図中に矢印で示すように、 $\phi=60^\circ$ のドームは、X方向が正の変形に対してZ方向は右上がりに変形しているのに対して、 $\phi=120^\circ$ のドームは、Z方向が右下がりに変形している。

4.2 加速度応答値分布

各質点に作用する加速度応答値分布を図-6に示す。これは、 $\phi=60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 、部材サイズP-114、自重 $w=100\text{kgf/m}^2$ のドームに対して、ELCENTRO波を入力した場合の応答値であり、水平方向（X方向）と鉛直方向（Z方向）を分けて示している。Y方向の応答に関しては、きわめて小さいので省略している。また、この分布は、水平方向および鉛直方向のベースシア係数 C_{H0} 、 C_{V0} の値が最大となった時刻に対して示したものであり、両者の時刻は一致していない。

この図より、ドームは水平地震動のみ受けているにもかかわらず、鉛直方向にも振動し力が加わっていることが分かる。また、支持点からある程度離れた節点に対して、X方向の加速度は、高さと同円周方向にほぼ均一な分布を示しているのに対して、Z方向の加速度は、各層においてX座標の絶対値の大きさにほぼ比例し大きくなっており、当然のことであるがY軸に対して逆対称となっている。これは、加速度応答が図-5に示す1次の固有モードと密接に対応しているためと考えられる。さらに、ドームの半開角 ϕ との関係を見た場合、 $\phi=60^\circ, 120^\circ$ と比較し、 $\phi=90^\circ$ ではZ方向の加速度の値は小さいことが分かる。これも固有モードと対応しているためであるが、最下層の立上がり角度の影響が最も大きいと考えられる。すなわち、水平地震荷重を受け層間変形が最も大きくなる最下層に対して、その立上がり角度が 90° に近いほどZ方向の変形が小さくなるため、加速度応答も小さくなると考えられる。

図-7に、各ドーム頂部より8層目の節点（図-6に示す点a、b、c）の絶対加速度時刻歴応答を示す。こ

の図より、 $\phi=60^\circ$ のドームの場合、X方向に正の力が作用した時Z方向も正の力が作用しているのに対して、 $\phi=90^\circ, 120^\circ$ の場合は逆の応答を示しているのが分かる。すなわち、静的解析において鉛直方向の力を考慮する場合は、図-8に示すように $\phi < 90^\circ$ と $\phi \geq 90^\circ$ で荷重を逆方向に加える必要がある。

図-5 1次固有モード

表-4 固有周期と刺激係数（ $\phi=60^\circ$, P-114）

	固有周期 (sec)	刺激係数	
		X方向	Z方向
1次	0.297	-0.332×10^{-8}	0.457×10^{-1}
2次	0.289	0.162×10^{-2}	-0.106×10^{-6}
3次	0.288	0.566×10^{-8}	-0.138×10^{-2}
4次	0.288	-0.540×10^{-8}	0.567×10^{-3}
5次	0.285	0.747×10^{-3}	0.861×10^{-7}
6次	0.284	-0.104×10^{-2}	-0.517×10^{-7}
7次	0.281	-0.555×10^{-7}	0.132×10^{-3}
8次	0.280	0.803×10^{-1}	0.179×10^{-8}
9次	0.279	-0.269×10^{-7}	-0.438×10^{-3}
10次	0.275	-0.249×10^{-2}	-0.520×10^{-7}

図-6 加速度応答値分布

図-7 時刻歴加速度応答

図-8 鉛直方向に作用する荷重方向

4.3 層せん断力係数分布

水平および鉛直方向の層せん断力係数 C_{Hi} , C_{Vi} 分布の例を図-9に示す。これは、ドームの半開角 $\phi = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ のモデルに対して示したものであり、横軸はベースシア係数 C_{H0} , C_{V0} で、縦軸はドームのライズ H で無次元化されている。この図より、水平方向の層せん断力係数分布 C_{Hi} は、 ϕ が大きくなるほど C_{H0} に対するドーム頂部の応答が大きくなっていることが分かる。それに反して、鉛直方向の C_{Vi} は ϕ が小さいほど頂部の応答が大きくなる傾向にある。また、 C_{Hi} は高さ方向に対してほぼ線形的に大きくなっている。

筆者らは、前報¹⁴⁾において $\phi = 90^\circ$ のドームの C_i 分布の推定法について検討している。それは、ドームが1次固有周期で振動しているものと仮定し、ベースシア係数 C_{H0} を、地震波の応答スペクトルを用いて推定し、 C_{Hi} 分布は、高さ方向に線形的に近似させようとするものである。そこで、本研究では、さらにドームの半開角 ϕ をパラメータとしたドームの層せん断力係数の推定法について検討を行う。

先ず前報と同様に、ベースシア係数 C_{H0} および層せん断力係数 C_{Hi} を、式(2)、(3)を用いて表現する。

$$C_{H0} = \alpha(\phi) \cdot Sa(T_1) \quad (2)$$

$$C_{Hi} = C_{H0} \cdot (1 + \beta(\phi) \cdot h/H) \quad (3)$$

ここで, $S_a(T_1)$: 正規化加速度応答スペクトル
 $(=S_A(T_1)/g)$
 T_1 : ドームの1次固有周期(sec)
 g : 重力加速度($=980\text{cm/sec}^2$)
 H : ドームの高さ(m)
 h : i 層の高さ(m)

これらの式では, 係数 α および β の値を定めれば, ドームの1次固有周期と加速度応答スペクトル $S_A(T_1)$ により C_{Hi} が推定できる。本解析によって求められた α および β の値をそれぞれ図-10, 11に示す。図中, $\circ$ は解析値を示し, 実線と点線はそれぞれ解析値の平均値と標準偏差 σ を示している。

図-9 C_{Hi} および C_{Vi} 分布

図-10 $\phi - \alpha$ 関係

図-11 $\phi - \beta$ 関係

図-12 $\phi - \gamma$ 関係

図-10より、 α の値はほぼ0.6~1.0の間に分布しており、平均値は $\phi=75^\circ\sim90^\circ$ を頂点とし、そこから離れるほど小さくなる傾向にある。さらに、 $\phi=90^\circ$ でばらつきが一番小さく、 $\phi=90^\circ$ から離れるほどばらつきが大きくなっている。すなわち、 $\phi=90^\circ$ 附近のドームが最も1質点系に近い応答を示していると考えられる。また、図-11より、 β の平均値は ϕ が大きくなるにしたがい大きくなっており、ばらつきも大きくなっている。

次に、鉛直方向の層せん断力係数 C_{vi} を式(4)、(5)を用いて表現する。

$$C_{v0} = \gamma(\phi) \cdot C_{H0} \quad (4)$$

$$C_{vi} = C_{v0} \quad (5)$$

本解析によって得られる γ の値を図-12に示す。鉛直方向に作用するせん断力に関しては、図-8に示すように $\phi < 90^\circ$ と $\phi \geq 90^\circ$ で方向が逆になるため、X軸に対して正の方向にせん断力が作用したとき、Y軸に対して右回りのモーメントが発生する場合の γ を正とする。この γ の値より、 $\phi=75^\circ$ と $\phi=90^\circ$ の間で鉛直荷重の方向が逆転しており、この付近では鉛直方向の応答が小さいことが分かる。しかし、 $\phi=60^\circ, 120^\circ$ に対する γ の値は大きく、静的解析に対する鉛直方向の荷重の影響は無視できないと考えられる。

高さ方向の C_{vi} 分布は、図-9に示すように C_{v0} に対して多少凸凹しているが、水平地震荷重を受け最も大きなせん断力を受ける最下層に注目した場合、その分布の影響は小さいため一律 C_{v0} の値を用いるものとする。

5. 動のおよび静的解析による断面力の比較

5.1 静的解析用定数 α , β , γ を用いた解析

以上の解析結果より、ドームの半開角 ϕ をパラメータとした静的解析用定数を以下のように仮定する。まず α に関しては、標準偏差 σ を参考にし、一律 $\alpha=0.9$ とする。次に、 β および γ に関しては、その平均値を参考にし、 β は2直線、 γ は直線によって近似する。その各値を表-5に示す。また、図-10, 11, 12には、その値を▲マークで示している。ここで定めた α , β , γ と地震加速度応答スペクトル $S_A(T_1)$ を用いてそれぞれ C_{Hi} , C_{vi} を計算し、図-4に示す静的荷重により線形解析を行う。Z方向の静的荷重の作成にあたって、図-6の加速度分布に示されるように、各層内で変化させるのが望ましいが、荷重の入力が複雑となり実用的ではないので、Z方向荷重は各層で平均化して与える。

5.2 断面力の比較

動のおよび静的解析による断面力の比較を行う際に、すべての部材で比較するのは大変困難となるので、上層

表-5 静的解析用定数 α , β , γ

	$\phi = 60^\circ$	$\phi = 75^\circ$	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 105^\circ$	$\phi = 120^\circ$
α	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
β	0.40	0.45	0.50	0.70	0.90
γ	-0.30	-0.10	0.10	0.30	0.50

と最下層そしてその中間の3層を選び出し、それぞれ最も大きな軸力を受ける斜材に注目し検討する。ここで、上層は半開角 ϕ にかかわらず頂部から3層目とし、中層は $\phi=60^\circ\sim90^\circ$ は頂部から7層目、 $\phi=105^\circ, 120^\circ$ はそれぞれ8, 9層目とする。なお、静的荷重は、鉛直方向の層せん断力係数の影響を調べるため、 C_{Hi} のみ考慮した場合と C_{Hi} , C_{vi} の両方を考慮した場合の2ケースの軸力を計算する。 C_{Hi} のみ考慮した場合の斜材の最大軸力を $N_H^{\max}$ とし、 C_{Hi} , C_{vi} の両方を考慮した場合の最大軸力を $N_{HV}^{\max}$ とする。また、動的解析より得られる最大軸力を $N_D^{\max}$ とする。 $N_D^{\max}$ をそれぞれ $N_H^{\max}$ と $N_{HV}^{\max}$ で除した値 ν_H , ν_{HV} を、図-13に示す。図中、実線と点線はそれぞれ ν_H , ν_{HV} の平均値と標準偏差 σ を示している。図は上から上層、中層、下層の順に並んでおり、左側は水平荷重のみ考慮した場合、右側は水平と鉛直の両方を考慮した場合である。

この図より、 ν_H および ν_{HV} の値は、上層ほど大きくなっており、またそのばらつきも大きくなっている。次に ν_H と ν_{HV} を比較すると、 $\phi \geq 90^\circ$ の場合は上層部の $\phi=120^\circ$ 付近を除いて両者の差は小さいが、 $\phi < 90^\circ$ の場合は ν_{HV} の値が ν_H より小さくなっており、ほぼ1.0以下を示している。これは、層せん断力係数として C_{Hi} , C_{vi} の両方を考慮することの有効性を示したものであり、水平地震動に対する静的解析において、水平のみではなく鉛直方向の荷重も考慮することにより、断面力がより安全側に推定されている。ただし、 $\phi \geq 90^\circ$ の上層部では、 ν_{HV} の値が1.5を越える場合もあり、 $\phi \geq 90^\circ$ の上層部の軸力の推定にあたっては、 ν_{HV} の標準偏差 σ を考慮し多少割り増した値を用いる必要があると考えられる。

以上、動のおよび静的解析から得られる断面力の比較により、水平地震動を受けるドームの断面力は、ドームの1次固有周期 T_1 、地震加速度応答スペクトル $S_A(T_1)$ および静的解析用定数 α , β , γ を用いて静的解析を行うことにより、推定できると考えられる。

6. 結語

6.1 結論

本研究では、図-1に示すような層状に組まれた高ライズの単層ラチスドームを対象とし、水平地震動に対する層せん断力係数 C_i 分布の検討を行った。限られた条

図-13 (a) 上層部 $\phi - \nu_H, \nu_{HV}$ 関係

図-13 (b) 中層部 $\phi - \nu_H, \nu_{HV}$ 関係

図-13 (c) 下層部 $\phi - \nu_H, \nu_{HV}$ 関係

件下ではあるが、得られたことを要約すると、

(1) 文献3)で示されている結果と同様に、水平地震動を受けるドームに対しても局所的な鉛直力が発生していることが認められた。また、その鉛直力は、ドームの半開角 $\phi=90^\circ$ 附近で最も小さくなり、 ϕ が 90° から離れるほど大きくなることが分かった。

(2) 水平方向の層せん断力係数 C_{Hi} は、ドームの1次固有周期と入力地震波の応答スペクトルによって整理され、 ϕ をパラメータとした係数 α および β により推定できることを示した。そして、鉛直方向の層せん断力係数 C_{Vi} は、水平方向のベースシア係数 C_{H0} と係数 γ によって表せることを示した。

(3) 表-5に示す静的解析用定数 α 、 β 、 γ を用いて静的解析を行うことにより、応答解析から得られる断面力をほぼ安全側に推定できることを示した。

6.2 今後の課題

本研究では、まだ限られた場合の検討を行ったにとどまり、さらにこの考えを一般的なものにしていくためには、今後の課題として、

- (1) 水平動と上下動を同時に受けた場合の挙動
- (2) 大スパン構造に対する地震波の位相の影響
- (3) 基礎、下部構造と上部構造を含めた応答性状等を考慮し、地震波やモデルを変化させたパラメトリックな検討を進める必要がある。

謝辞

本研究を実施するにあたり、巴コーポレーション・松下富士雄博士、久保寺勲博士、植木隆司博士からは終始有益な御助言を頂き、井手知佳子氏には図表作成に援助を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 高島英幸, 西園博美, 加藤史郎: 上下動を受ける矩形平面状の屋根型偏平球殻の応答性状, 日本建築学会構造系論文報告集, 第383号, pp. 58~67, 1988. 1
- 2) 斎藤公男: スペース・ストラクチャーのデザイン, 季刊カラム, Vol. 83, pp. 28~33, 1982. 1
- 3) 西村敏雄, 新宮清志: 上下動および水平動地震を受ける椀梁付回転体シェルの動的応答に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第326号, pp. 47~59, 1983. 4
- 4) 國枝治郎: 上下動を受ける球形シェルの非線形応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1157~1158, 1981. 9
- 5) Haruo Kunieda: Solutions of Free Vibrations of Spherical Shells, 日本建築学会構造系論文報告集, 第325号, pp. 57~66, 1983. 3
- 6) 田波徹行, 本間靖章, 半谷裕彦: 単層スペースフレームの振動特性に関する研究(その2. 部材にバネを用いたモデルによる上下振動実験), 日本建築学会学術講演梗概集(近畿), pp. 1309~1310, 1987. 10

- 7) 石川浩一郎: スペースフレームの耐荷力に関する解析的研究, 豊橋技術科学大学博士学位論文, 1990
- 8) 加藤史郎, 石川浩一郎, 横尾義貫: 大スパントラス構造物の耐震性に関する研究-上下地震動を受ける平行弦トラスばりの耐震性について-, 日本建築学会構造系論文報告集, 第360号, pp. 64~74, 1986. 2
- 9) 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, 第413号, pp. 87~96, 1990. 7
- 10) 大屋竹之: 鉄骨立体骨組構造の耐震性に関する研究, 東京工業大学博士学位論文, 1969. 12
- 11) 日建設計・大阪本社: 大阪城国際文化スポーツホールの構造設計, 日本建築総合試験所GBRC, Vol. 8, pp. 10~20, 1983
- 12) Zhang, Y., Lan, T.: Analysis of Space Frame under Vertical Earthquake Loads, IABSE 12th Congress Final Report, pp. 169~176, 1984
- 13) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 1993
- 14) 加藤史郎, 向山洋一, 植木隆司: 高ライズの単層ラチスドームの地震応答性状, 日本建築学会構造系論文報告集, 第442号, pp. 101~109, 1992. 12

(1994年5月10日原稿受理, 1994年10月4日採用決定)