

# 等価な静的地震荷重による骨組膜屋根構造物の応答評価

- シングルレイヤー屋根型円筒シェルへの適用例 -

藤原 淳<sup>\*1</sup>  
竹内 徹<sup>\*2</sup>  
小田 憲史<sup>\*3</sup>

## 梗 概

現行の建築基準法では、地震荷重は水平な静的荷重として与えられる。しかし、膜構造物等の大スパン構造物に地震動が入力した場合、屋根面に鉛直な振動が生じることが知られている。従って、水平な静的荷重のみを用いた大スパン構造物の地震応答評価は、危険側の評価になる可能性がある。これに対し、著者らは、中規模ラチス構造物を対象として、静的荷重を用いて地震応答を評価する手法を提案している。本論文では、既提案の地震応答評価手法に基づいて静的な地震荷重を設定し、シングルレイヤーの屋根型円筒シェルを有する骨組膜構造物に適用する。応答スペクトル法による結果との比較を行い、地震応答評価の精度について論じる。

### 1. はじめに

膜構造物のような大スパン構造物に水平な地震動が入力した場合、構造物全体の水平振動に加え、屋根面に鉛直な振動が生じることが知られている。そして、この屋根面の鉛直振動を設計に反映するための、考察、提案がこれまで数多くなされている<sup>1-3)</sup>。

現行の許容応力度設計法では、地震は水平方向の静的荷重として表されるが、水平方向の静的荷重のみを用いた膜構造物の地震応答評価は危険側の評価となる可能性がある。よって、一定規模以上の膜構造物は許容応力度設計法の適用範囲外となり、時刻歴応答解析による地震応答評価が必要となる。しかし、膜構造物のように軽量で大スパンの構造物の設計では風荷重が支配的であるため、概略の地震応答評価を簡便に行うことのできる手法が設計上有用であると考えられる。

著者ら<sup>4-6)</sup>は、応答スペクトル法によるパラメトリックスタディに基づいて、中規模ラチス構造物の地震応答評価手法を提案している。この手法では、構造物と屋根架構の固有周期比と質量比に応じて、屋根面の水平および

鉛直方向の加速度応答を増幅させ、得られた加速度応答に基づいて静的な地震荷重を設定している。

本報告では、文献 4-6)の手法を、実施工物件を模した、シングルレイヤーの屋根型円筒シェルを有する骨組膜構造物に適用する。ここでは、2種類の境界条件を考慮した例題を行う。さらに、応答スペクトル法による地震応答解析を実施する。両手法での結果を比較し、地震応答評価手法<sup>4-6)</sup>の精度について検討する。

### 2. 対象構造物

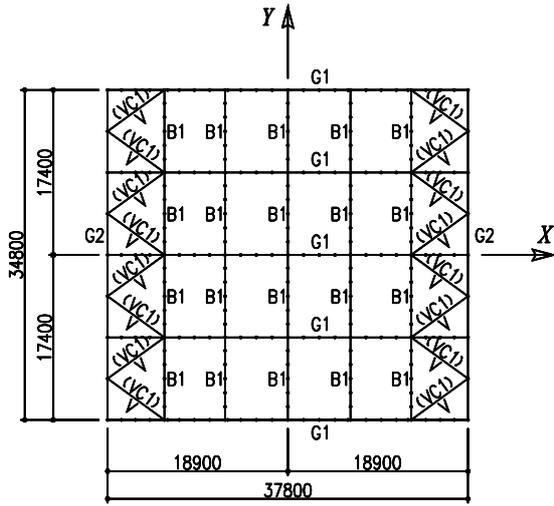
RC ラーメンの下部構造の上に単層の鉄骨アーチを配して構成された屋根型円筒シェルを有する骨組膜構造物を対象とする。構造部材の、平面図、立面図 (X-Z 平面と Y-Z 平面)、鳥瞰図を、それぞれ図 1(a)-(d)に示す。

図 1(a)-(c)の C1, C2, C3, G1 - RC, FG3 が RC, G1, G2, B1, V, VC1, VC2, P1 が鉄骨である。RC の断面寸法と材質、および鉄骨の部材と材質は、それぞれ表 1, 2 に列挙した通りである。

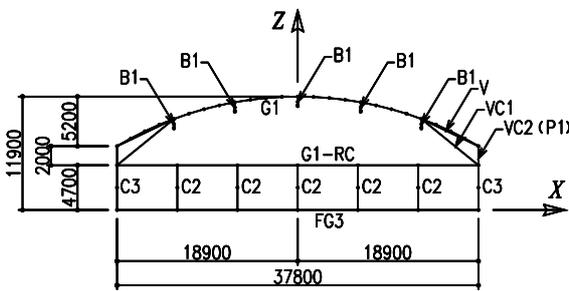
\*1 太陽工業株式会社 空間技術研究所 主任 博士 (工学)

\*2 東京工業大学大学院 理工学研究科 建築学専攻 助教授 博士 (工学)

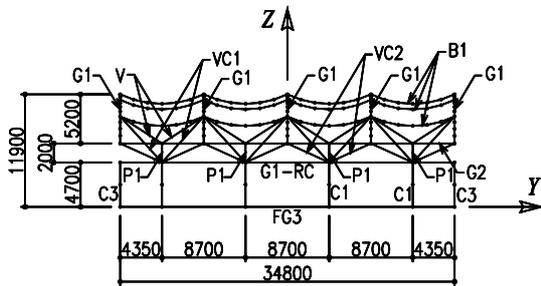
\*3 太陽工業株式会社 空間技術研究所 所長 博士 (工学)



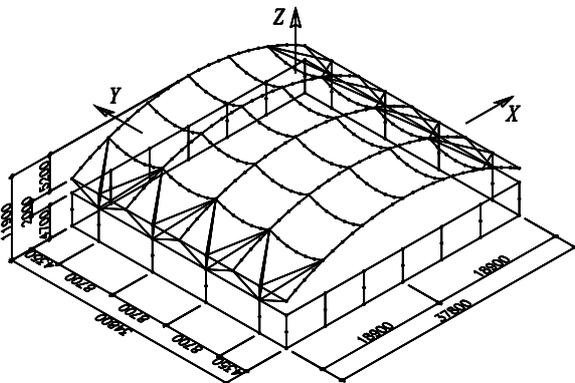
(a) : 平面図



(b) : 立面図 (X-Z平面)



(c) : 立面図 (Y-Z平面)



(d) : 鳥瞰図

図1 解析対象構造物概要

表1 RC部材断面リスト

記号	幅 × せい	材質
C1	600 × 600	Fc21
C2	600 × 600	Fc21
C3	600 × 600	Fc21
G1 - RC	600 × 500	Fc21
FG3	350 × 800	Fc21

表2 鉄骨部材断面リスト

記号	部材	材質
G1	P - 457.2 × 12.7t	STK400
G2	P - 318.5 × 7.9t	STK400
B1	P - 318.5 × 7.9t	STK400
V	P - 216.3 × 8.2t	STK400
VC1	P - 190.7 × 5.3t	STK400
VC2	P - 139.8 × 4.5t	STK400
P1	H - 250 × 250 × 9 × 14	SS400

表3 基礎形状および回転剛性

	C1	C2	C3
$W_x$ (mm)	5000	1500	2000
$W_y$ (mm)	2500	2500	1000
$D$ (mm)	1300	1300	1300
$S_x$ ( $kN \cdot m / rad$ )	4.993 $\times 10^6$	2.515 $\times 10^5$	3.466 $\times 10^5$
$S_y$ ( $kN \cdot m / rad$ )	1.248 $\times 10^6$	6.987 $\times 10^5$	8.665 $\times 10^6$

断面 2 次半径を  $i$  , スパンを  $L$  とすると , 対象構造物のデプス-スパン比は  $2 \cdot i / L = 1 / 120.38$  である。これは、応答評価式<sup>4-6)</sup>の適用範囲(1/100 程度以上)から外れるが、手法の適用範囲の確認も含め例題を実施する。

材端の接続条件は、P1 下端と、V、VC1、VC2 の両端のみピン接合とし、それ以外は全て剛接合とする。

境界条件は、

1. C1 と C3 の柱脚は X 軸まわりの回転以外を拘束し、C2 の柱脚は Y 軸まわりの回転以外を拘束。
2. 基礎の回転剛性を考慮。

の 2 種類を考慮する。基礎の回転剛性は、N 値が 25 程度の砂質土地盤を仮定して、文献 7) より求める。基礎は全て X、Y 軸に平行な長方形平面を有するとする。各基礎の X 軸方向長さ  $W_x$ 、Y 軸方向長さ  $W_y$ 、GL から基礎底面までの深さ  $D$ 、X 軸まわりの回転剛性  $S_x$ 、Y 軸まわりの回転剛性  $S_y$  を、表 3 に示す。

表 4 構造物の各部重量

部位	重量 (kN)
屋根架構 : $M_R$	890.7
下部構造 : $M_S$	2328.7
全体 : $M_{eq} = M_R + M_S$	3219.4

ここで、図 1 (a)-(d) に示した構造材以外にも、屋根膜材とケーブル、および妻面と下部構造の壁の重量も考慮する。屋根膜材とケーブルの重量は、G1 材に均等に配分する。また、壁の重量は、上下の梁に対して均等に配分する。下部構造の重量の内、基礎梁 (FG3) および柱と壁の下半分の重量は 構造物の振動に寄与しないと考え、それ以外の重量のみを考慮する。構造物の屋根架構重量  $M_R$ 、下部構造重量  $M_S$  および全体重量  $M_{eq}$  を表 4 に示す。

### 3. 固有値解析

#### 3.1 構造物を等価 1 質点系としたときの固有周期

屋根架構の支持レベル (G1 - RC 材のレベル) を剛床とした等価 1 質点系を仮定し、構造物の固有周期  $T_{eq}$  を求める。剛床としたレベルに X 軸正方向の静的荷重  $P = 1.0$  kN を作用させ、変位  $u$  を求める。X 軸方向の剛性  $K_{eq}$  は、荷重  $P$  と変位  $u$  から以下の式のように得られる。

表 5 等価 1 質点系を仮定した場合の固有周期  $T_{eq}$

基礎の回転剛性を考慮しない	基礎の回転剛性を考慮する
0.247 sec.	0.226 sec.

$$K_{eq} = \frac{P}{u} \quad (1)$$

$K_{eq}$  と構造物全体の質量  $M_{eq}$  から、固有周期  $T_{eq}$  は、

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{eq}}{K_{eq}}} \quad (2)$$

となる。

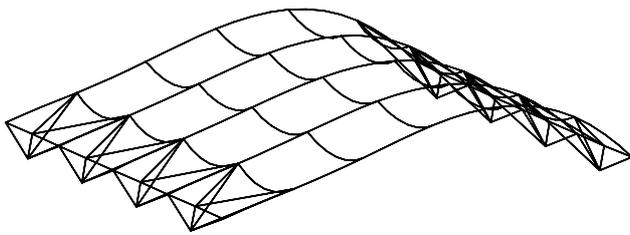
計算より、基礎の回転剛性を考慮しない場合とする場合で、 $u$  の値はそれぞれ  $4.690 \times 10^{-6}$  m と  $3.938 \times 10^{-6}$  m となる。式(1)、(2)から、基礎の回転剛性を考慮しない場合とする場合の  $T_{eq}$  は表 5 のように得られる。

#### 3.2 屋根架構の固有周期

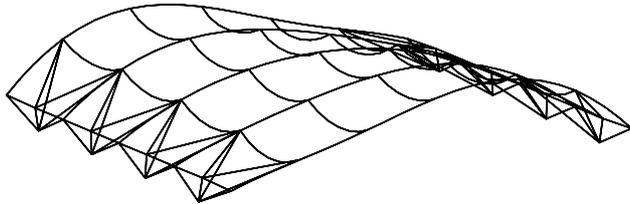
固有値解析を行い、屋根架構の逆対称 1 次モードの固有周期  $T_R$  を求める。ここで、下部構造との取り合い個所の節点をピン支持とする。1-15 次の固有周期と有効質量比を表 6 に、1-5 次の固有モードをそれぞれ図 2 (a)-(e) に示す。

表 6 固有周期と有効質量比 (屋根架構)

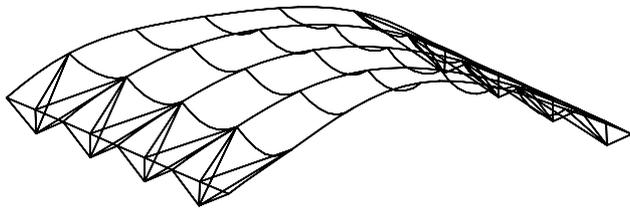
次数	固有周期 (sec.)	X 軸方向有効質量比 (%)		Y 軸方向有効質量比 (%)		Z 軸方向有効質量比 (%)	
			合計		合計		合計
1	0.693	44.65	44.65	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.565	0.00	44.65	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.461	0.00	44.65	33.14	33.14	0.00	0.00
4	0.381	0.00	44.65	0.00	33.14	17.72	17.72
5	0.355	0.00	44.65	11.18	44.32	0.00	17.72
6	0.308	0.88	45.52	0.00	44.32	0.00	17.72
7	0.245	0.00	45.52	0.00	44.32	0.26	17.98
8	0.219	0.00	45.52	0.00	44.32	0.00	17.98
9	0.187	0.00	45.52	0.67	44.99	0.00	17.98
10	0.183	0.00	45.52	0.00	44.99	0.00	17.98
11	0.183	10.03	55.56	0.00	44.99	0.00	17.98
12	0.175	0.00	55.56	0.00	44.99	13.51	31.49
13	0.169	0.00	55.56	2.00	46.99	0.00	31.49
14	0.162	0.00	55.56	0.00	46.99	0.00	31.49
15	0.157	1.66	57.21	0.00	46.99	0.00	31.49



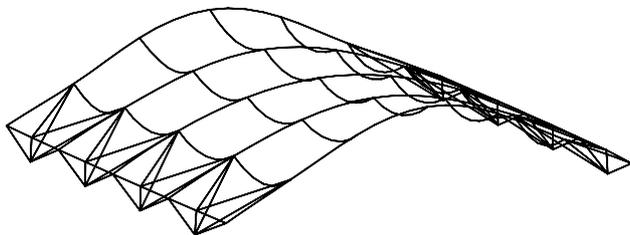
(a) : 1次モード



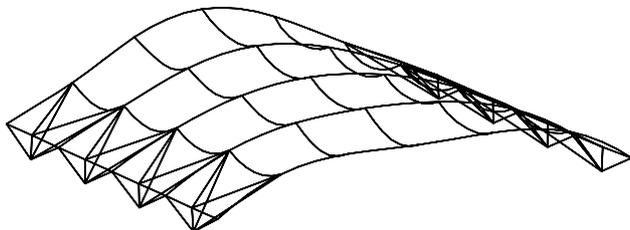
(b) : 2次モード



(c) : 3次モード



(d) : 4次モード



(e) : 5次モード

図2 屋根架構の固有モード

表7 加速度応答スペクトルに関するパラメータ

地震レベル	数値Z	地盤種別	減衰h
極めて稀	1.0	第二種	0.02

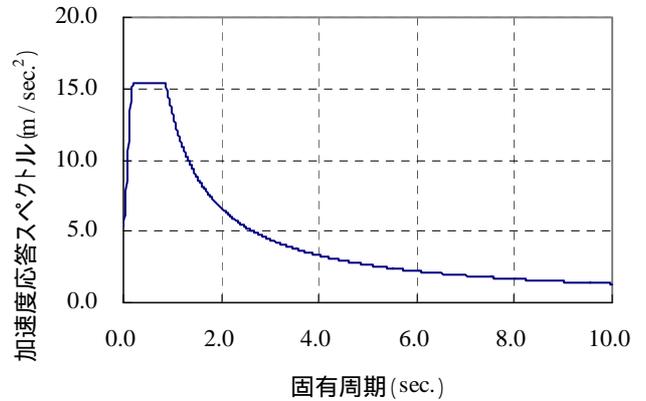


図3 加速度応答スペクトル

表6より, 1-15次のX軸方向の有効質量比和は57.21%である。また図2(a)から, 全体の1次モードが逆対称1次モードである。よって, 屋根架構の逆対称1次固有周期は, 表6から,

$$T_R = 0.693 \quad \text{sec.} \quad (3)$$

となる。

#### 4. 例題

##### 4.1 考慮する地震および加速度応答スペクトル

平成12年国土交通省告示第1461号 四,イに基づき, 解放工学基盤での加速度応答スペクトル  $S_{A0}$  を定める。きわめて稀に発生する地震動(レベル2)を想定すると, 固有周期  $T$  に応じて  $S_{A0}$  が以下のように得られる。

$$S_{A0} = \begin{cases} (3.2 + 30T)Z & T < 0.16 \\ 8.0Z & 0.16 \leq T < 0.64 \\ (5.12/T)Z & 0.64 \leq T \end{cases} \quad \text{m/sec.}^2 \quad (4)$$

ここでは,  $Z = 1.0$  とする。次に, 表層地盤による加速度の増幅率  $G_s$  を設定する。第二種地盤を仮定して, 平成12年国土交通省告示第1457号, 第7, 二の表2から,

$$G_s = \begin{cases} 1.5 & T < 0.64 \\ 1.5 \cdot (T/0.64) & 0.64 \leq T < 0.864 \\ 2.025 & 0.864 \leq T \end{cases} \quad (5)$$

を得る。 $S_{A0}$  と  $G_s$  から, 地表面での加速度応答スペクトル  $S_A$  を以下のように定める。

$$S_A = S_{A0} \cdot G_s \quad (6)$$

告示で定められている加速度応答スペクトルは、減衰定数 5%に対応するものである。ここでは、構造物の減衰定数を 2% ( $h = 0.02$ ) と仮定するので、文献 7) に基づいて、応答スペクトルの補正を行う。文献 7) より、減衰定数による補正定数  $C_D$  は、

$$C_D = \begin{cases} 1 & T \leq 0.05 \\ 1 - \frac{15.5h - 0.77}{33h + 1} \cdot \frac{\log T + 1.30}{0.6} & 0.05 < T \leq 0.2 \\ 1 - \frac{15.5h - 0.77}{33h + 1} & 0.2 < T \end{cases} \quad (7)$$

となる。(4)-(6)に  $Z = 1.0$ ,  $h = 0.02$ ,  $T = T_{eq}$  を代入して、表 5 から、1 質点系の応答加速度  $A_{eq}$  は、以下のように与えられる。

$$A_{eq} = S_A \cdot C_D = 15.325 \text{ m/sec.}^2 \quad (8)$$

応答スペクトルに関するパラメータを表 7 にまとめる。また、加速度応答スペクトルを図 3 に図示する。

#### 4.2 静的地震荷重の設定

文献 4-6) から、固有周期比  $R_T$  と質量比  $R_M$  を、以下のように定める。

$$R_T = \frac{T_{eq}}{T_R} \quad (9)$$

$$R_M = \frac{M_{eq}}{M_R} \quad (10)$$

ここで、鉛直増幅率に関する係数を  $C_V = 1.33$ , アーチの半開角を  $\theta$  (rad) として、水平方向の応答増幅率  $F_H$  と鉛直方向の応答増幅率  $F_V$  を、

$$F_H = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\frac{1}{R_T}} + 1 \right) \quad (11)$$

$$F_V = \left( \sqrt{\frac{5}{R_T}} - 1 \right) \cdot C_V \cdot \theta \quad (12)$$

のように求める<sup>4-6)</sup>。

文献 4-6) では、妻面での拘束の度合いに応じて 2 種類の屋根面での加速度分布を提案している。まず、円筒シェルのように妻面において屋根架構が拘束される場合には、平面図の図心を原点として、水平および鉛直加速度の分布を以下のように提案している。ここで、 $L_x$  と  $L_y$

をそれぞれ構造物の  $X, Y$  軸方向寸法とする。

$$A_H = A_{eq} \left\{ 1 + (F_H - 1) \cos \pi \left( \frac{x}{L_x} \right) \cos \pi \left( \frac{y}{L_y} \right) \right\} \quad (13)$$

$$A_V = A_{eq} F_V \sin \pi \left( \frac{2x}{L_x} \right) \cos \pi \left( \frac{y}{L_y} \right) \quad (14)$$

また、妻面での拘束が小さく、連続した断面が同じように挙動することが予測される場合には、以下のような加速度分布を用いることを提案している。

$$A_H = A_{eq} \left\{ 1 + (F_H - 1) \cos \pi \left( \frac{x}{L_x} \right) \right\} \quad (15)$$

$$A_V = A_{eq} F_V \sin \pi \left( \frac{2x}{L_x} \right) \quad (16)$$

本報告では、(13)と(14), または(15)と(16)で表される 2 種類の加速度分布を図 1 の構造物に適用し、比較、検討を行う。

さらに、水平方向に一樣に  $A_{eq}$  の加速度を作用させた場合についても検討を行う。

#### 4.3 応答スペクトル法による地震応答解析

4.2 節で定めた等価な静的地震荷重<sup>4-6)</sup>の妥当性を検証するため、応答スペクトル法による地震応答評価を併せて行い、結果を比較する。

応答スペクトルは、4.1 節で定義したもの(式(4)-(7))を採用する。重ね合わせは CQC 法を用い、1-40 次モードを対象とする。1-40 次までの有効質量比和は、基礎の回転剛性を考慮しない場合とする場合で、それぞれ 95.40% と 95.40% である。すべての次数において、減衰定数を 0.02 とする。応答スペクトル法に関するパラメータを表 8 にまとめる。

#### 4.4 計算結果

境界条件が 2 ケース(基礎の回転剛性を考慮しない場合とする場合), 荷重が 4 ケース( (13)と(14), (15)と(16), 水平方向のみに(8), 応答スペクトル法)であるので、合計 8 ケースの解析を行う。解析ケースを表 9 にまとめる。以下では、解析ケースを表 9 の記号を用いて表す。

表 8 応答スペクトル法に関するパラメータ

重ね合わせ	使用するモード	減衰定数
CQC 法	1-40 次	0.02

表9 解析ケース一覧

境界条件	荷重	記号
基礎の回転剛性を考慮しない	(13)と(14)	P - SH
	(15)と(16)	P - AR
	水平方向のみに(8)	P - HR
	応答スペクトル法	P - RS
基礎の回転剛性を考慮する	(13)と(14)	S - SH
	(15)と(16)	S - AR
	水平方向のみに(8)	S - HR
	応答スペクトル法	S - RS

図4-11に、ある要素または節点の静的荷重による応答を横軸の座標値、応答スペクトル法による応答を縦軸の座標値としてプロットする。つまり、45度勾配の直線上に点があれば、応答スペクトル法と静的荷重とで得られた応答が一致したことを表す。よって第1象限では、45度勾配の直線より下または上に点がある場合は、応答スペクトル法と比べて、それぞれ安全側または危険側の評価が得られたことになる。第3象限では、反対に下が危険側、上が安全側の評価となる。

図4-7に、基礎の回転剛性を考慮しない場合の、G1材の水平変位、鉛直変位、軸力、曲げモーメントをそれぞれ図示する。

図4-7から、P - SHでは水平変位でやや過剰に安全側の評価となるものの(約1.5倍)、鉛直変位、軸力、曲げモーメントは応答スペクトル法とよく対応した結果が得られている。一方、P - ARでは安全側、P - HRでは危険側の評価が得られる傾向にある。

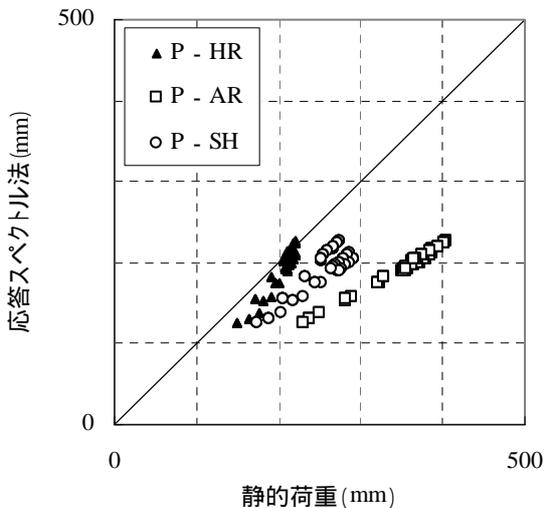


図4 水平変位 (基礎の回転剛性を考慮しない)

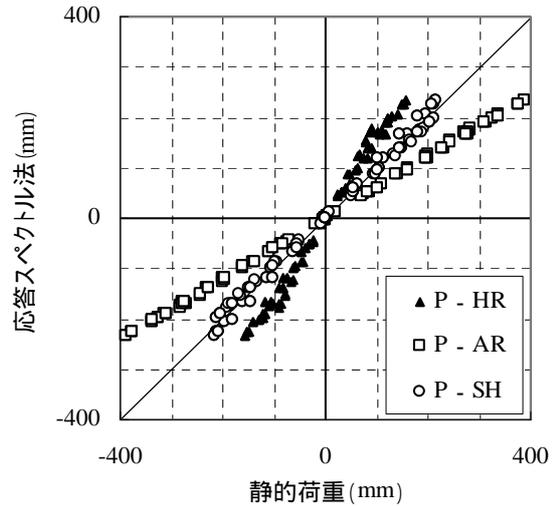


図5 鉛直変位 (基礎の回転剛性を考慮しない)

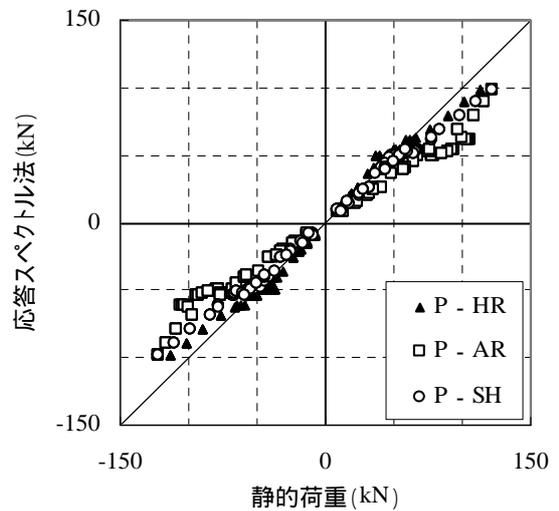


図6 軸力 (基礎の回転剛性を考慮しない)

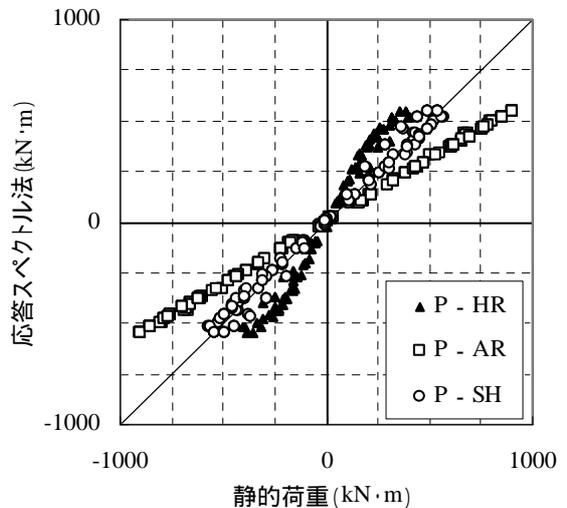


図7 曲げモーメント (基礎の回転剛性を考慮しない)

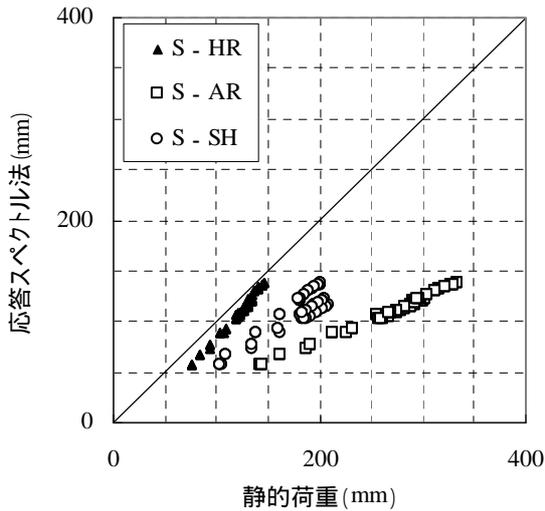


図 8 水平変位 (基礎の回転剛性を考慮する)

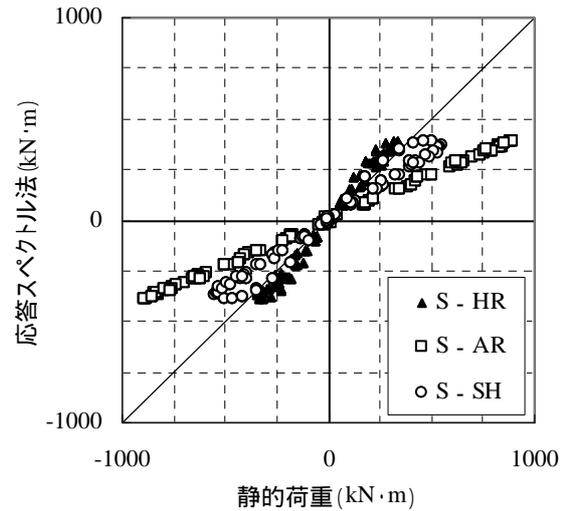


図 11 曲げモーメント (基礎の回転剛性を考慮する)

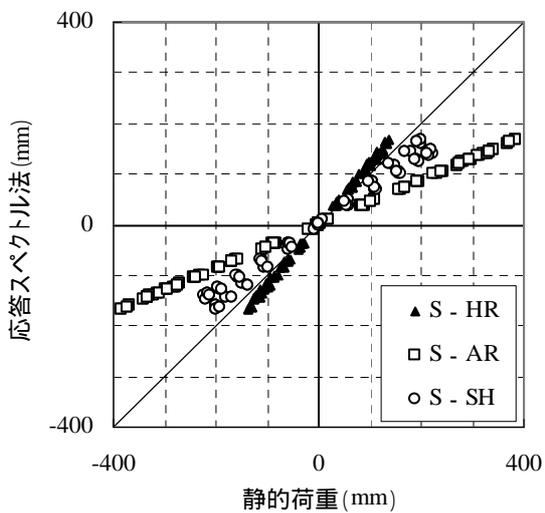


図 9 鉛直変位 (基礎の回転剛性を考慮する)

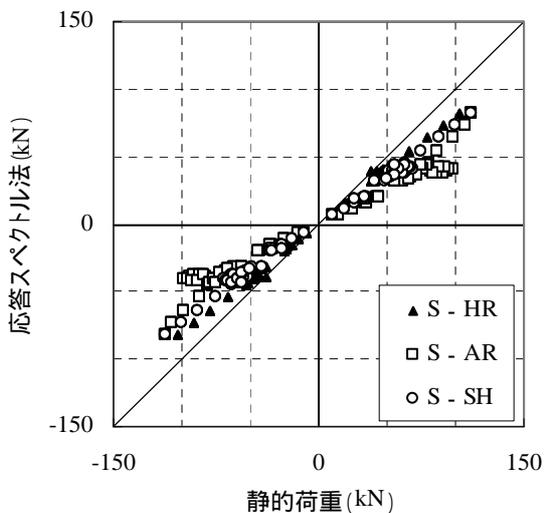


図 10 軸力 (基礎の回転剛性を考慮する)

表 10 最大曲げモーメント (kN・m)

(a) : 基礎の回転剛性を考慮しない

P - SH	P - AR	P - HR	P - RS
567.84	904.55	406.06	545.64

(b) : 基礎の回転剛性を考慮する

S - SH	S - AR	S - HR	S - RS
547.85	893.05	348.45	388.85

P - SH, P - AR, P - HR, P - RS の最大曲げモーメントを, 表 10 (a) にまとめる。表 10 (a) から, P - RS に対する P - SH, P - AR, P - HR の比は, それぞれ 1.041, 1.658, 0.744 である。

以上の結果から, 等価な静的地震荷重を用いた応答評価<sup>4-6)</sup>では, 安全側の応答評価が得られた。特に(13)と(14)で表される加速度応答分布を用いた場合は, 応答スペクトル法と非常によく対応した結果が得られた。一方, 地震を水平な荷重としてのみ評価した場合は, 危険側の評価が得られた。

図 8-11 に, 基礎の回転剛性を考慮する場合の, G1 材の水平変位, 鉛直変位, 軸力, 曲げモーメントをそれぞれプロットする。図 4-11 から, 基礎の回転剛性を考慮する場合は, 考慮しない場合の応答が安全側にシフトしたような応答が得られる傾向が見られる。

基礎の回転剛性を考慮しない場合と同様に, 各荷重ケースでの曲げモーメントの最大値を, 表 10 (b) にまとめる。表 10 (b) から, S - RS に対する S - SH, S - AR, S - HR の比は, それぞれ 1.409, 2.297, 0.896 である。

表 10(a)と(b)から S - SH と P - SH , S - AR と P - AR , S - HR と P - HR , S - RS と P - RS の最大曲げモーメントの比は、それぞれ 0.965 , 0.987 , 0.858 , 0.713 である。静的荷重では基礎の回転剛性を考慮しても応答は大きくは変化しないのに対して、応答スペクトル法では基礎の回転剛性を考慮することにより応答が減少していることが分かる。

表 5 と式(9)から、基礎の回転剛性を考慮することによって固有周期比  $R_T$  が小さくなる。よって、(11)と(12)から、応答増幅率  $F_H$  ,  $F_V$  は大きくなる。

基礎の回転剛性を考慮しない場合は、C1 材は X 軸方向の荷重に対する剛性が非常に小さいため、荷重は端部のアーチに流れる傾向にあると考えられる。しかし、基礎の回転剛性を考慮する場合は、C1 材も X 軸方向の荷重を負担する。よって、屋根面の力の流れが均一化されると考えられる。

従って、基礎の回転剛性を考慮すると、応答増幅率を考慮して荷重を設定した場合は、入力荷重は増加する。一方、力の流れが均一化されるので応答の最大値は減少すると考えられる。表 10(a)と(b)から S - SH と P - SH , S - AR と P - AR , S - HR と P - HR の最大曲げモーメントの比は、それぞれ 0.965 , 0.987 , 0.858 であり、応答増幅率を考慮していない S - HR と P - HR の比が最も小さく、考察と同様の傾向がみられる。

基礎の回転剛性を考慮しない場合と、する場合のモデルに対して、固有値解析を行う。各モデルの 1-10 次の固有周期と X 軸方向の有効質量比を表 11 に示す。表 11 から、基礎の回転剛性を考慮しない場合では、1 次と 7 次が支配的なモードである。同様に、回転剛性を考慮する

場合では、1 次と 9 次が支配的であることが分かる。

基礎の回転剛性を考慮しない場合の 1 次と 7 次、考慮する場合の 1 次と 9 次のモード形状を、それぞれ図 12(a)-(d)に示す。図 12 の(a)と(c)は下部構造と屋根架構が同方向に振動するモード、(b)と(d)は下部構造と屋根架構が逆方向に振動するモードである。表 11 から、基礎の回転剛性を考慮しない場合は、下部構造と屋根架構が同方向に振動するモードの有効質量は、逆方向に振動するモードに比べて大きい。一方、基礎の回転剛性を考慮する場合は、下部構造と屋根架構が逆方向に振動するモードの有効質量が、同方向に振動するモードに比べて大きいことが分かる。

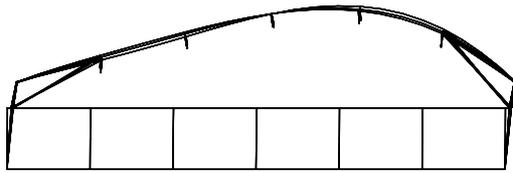
図 3 と表 11 から、基礎の回転剛性を考慮しない場合の 1 次と 7 次、考慮する場合の 1 次と 9 次の固有周期は、本論文で採用した応答スペクトルのピーク上にある。よって、これらのモードの応答への寄与は有効質量に大きく依存する。従って、基礎の回転剛性を考慮した場合は、下部構造と屋根架構が逆方向に振動するモードが支配的となり、屋根架構の応答が減少したものと考えられる。

以上の結果から、対象とする構造物のデプス-スパン比は応答評価手法<sup>4-6)</sup>の適用範囲を若干外れるものの、下部構造と屋根架構が同方向に振動するモードが支配的な構造物に対しては、応答評価法<sup>4-6)</sup>を用いることにより、精度の高い地震応答評価が可能であることが示された。

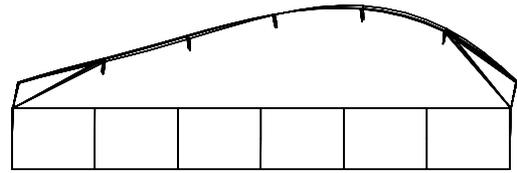
また、下部構造と屋根架構が逆方向に振動するモードが支配的となる場合は、等価な静的荷重<sup>4-6)</sup>により得られた応答と応答スペクトル法による応答との偏差は大きくなるものの、安全側の評価が得られた。S - RS と S - SH の最大曲げモーメントの比は、1.409 である。

表 11 構造物の固有値解析結果

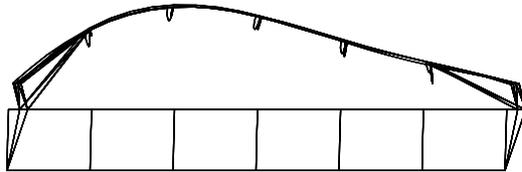
次数	基礎の回転剛性を考慮しない			基礎の回転剛性を考慮する		
	固有周期 (sec.)	X 軸方向有効質量比 (%)		固有周期 (sec.)	X 軸方向有効質量比 (%)	
			合計			合計
1	0.766	31.08	31.08	0.707	16.21	16.21
2	0.752	0.00	31.08	0.574	0.00	16.21
3	0.726	0.00	31.08	0.525	0.00	16.21
4	0.582	0.00	31.08	0.440	0.00	16.21
5	0.567	0.00	31.08	0.380	0.00	16.21
6	0.555	0.00	31.08	0.311	1.43	17.64
7	0.451	25.05	56.13	0.304	0.00	17.64
8	0.387	0.00	56.13	0.264	0.00	17.64
9	0.376	0.00	56.13	0.260	43.87	61.50
10	0.343	0.00	56.13	0.244	0.00	61.50



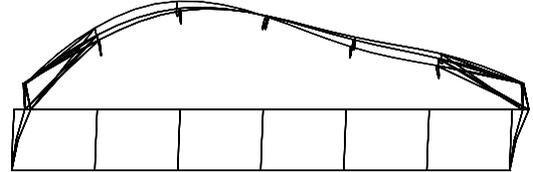
(a) : 1次モード (基礎の回転剛性を考慮しない)



(c) : 1次モード (基礎の回転剛性を考慮する)



(b) : 7次モード (基礎の回転剛性を考慮しない)



(d) : 9次モード (基礎の回転剛性を考慮する)

図 11 構造物の固有モード

## 5. まとめ

既提案の、大スパン構造物の屋根面鉛直振動を考慮した、等価な静的地震荷重<sup>4-6)</sup>を、シングルレイヤーの円筒状屋根を有する骨組膜構造物に対して適用した。下部構造の支持条件の異なる2つのモデルの計算を行い、それぞれ応答スペクトル法の結果と比較を行った。

対象構造物のデプス-スパン比は、応答評価法<sup>4-6)</sup>の適用範囲から若干外れるものの、応答スペクトル法に比べて、得られた応答はよく対応するか安全側の評価が得られた。結果を以下にまとめる。

1. 下部構造と屋根架構が同方向に振動するモードが支配的な場合は、静的な地震荷重を用いることにより、応答スペクトル法と非常によく対応した結果が得られた。静的荷重と応答スペクトル法での最大曲げモーメントの比は 1.041 となった。また、水平な静的荷重のみを考慮した計算も行い、危険側の評価となることを確認した。
2. 下部構造と屋根架構が逆方向に振動するモードが支配的な場合は、静的荷重の結果と応答スペクトル法の結果の偏差が大きくなった。しかし、安全側の評価が得られており、静的地震荷重と応答スペクトル法での最大曲げモーメントの比は 1.409 となった。

## 参考文献

- 1) 加藤 史郎,小西 克尚,中澤 祥二,向山 洋一,打越 瑞昌,下部構造に支持された空間構造の振動解析用質点簡易モデル,構造工学論文集,Vol. 48B, pp. 37-47, 2002.3

- 2) 中澤 祥二,加藤 史郎,吉野 達矢,小田 憲史,骨組膜構造の限界耐力計算に関する基礎的研究,膜構造研究論文集 2004, No. 18, 2004年12月
- 3) 山田 大彦,空間構造の地震応答に及ぼす下部構造の影響に関する初歩的考察,第10回「シェル・空間構造」セミナー資料,日本建築学会構造委員会 シェル・空間構造運営委員会, pp. 65-77, 2001.11
- 4) 竹内 徹,小河 利行,中川 美香,熊谷 智彦,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, No. 579, pp. 71-78, 2004年5月
- 5) 竹内 徹,小河 利行,山形 智香,熊谷 知彦,支持架構付き屋根型円筒ラチスシェルの地震応答評価,日本建築学会構造系論文集, No. 596, pp. 57-64, 2005年10月
- 6) 竹内 徹,小河 利行,空間構造の応答性状と制震・免震技術の応用,2005年度日本建築学会大会(近畿)構造部門(シェル・空間構造)パネルディスカッション資料,体育館・公共ホール地震被害と耐震改修, pp. 28-39, 2005年9月
- 7) 日本建築学会,鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 - 許容応力度設計法 -, 1999年11月
- 8) 建設省建築研究所,日本建築センター,設計用入力地震動作成手法技術指針(案),平成4年3月

# SEISMIC RESPONNS EVALUATION FOR FRAME-SUPPORTED MEMBRANE ROOF STRUCTURES USING EQUIVARENT STATIC LOADS

- An Example with a Single Layer Cylindrical Roof Structure -

Jun Fujiwara<sup>\*1</sup>

Toru Takeuchi<sup>\*2</sup>

Kenshi Oda<sup>\*3</sup>

## SYNOPSIS

In seismic design of general architectural structures, earthquake is considered as horizontal static loads. In several studies, however, it has been pointed that vertical vibration can be observed in seismic response of large-spanned roof structures such as frame-supported membrane structures. If seismic design of large-spanned structures is performed by using only horizontal static loads, structures may not have enough strength for earthquake.

For above mentioned problem, authors proposed a seismic response evaluation method. In our method, horizontal and vertical accelerations were considered, and they were amplified along ratio of fundamental frequencies of roof and structure.

In this paper, seismic design load proposed by authors is applied to a cylindrical frame-supported membrane structure. Response spectrum analysis is also performed, and results are compared. It is discussed that seismic response of frame-supported membrane structures can be accurately evaluated by using the method.

---

\*1 Research Engineer, Advanced R&D Department, Taiyo Kogyo Corporation, Dr. Eng.

\*2 Assoc. Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

\*3 Research Engineer, Advanced R&D Department, Taiyo Kogyo Corporation, Dr. Eng.