単層円筒ラチスシェル構造物の連続体置換を用いた静的地震荷重設定法

STATIC SEISMIC LOAD MODELING USING THE CONTINUUM SHELL
ANALOGY FOR LATTICED CYLINDRICAL SHELL STRUCTURES

山田 聖志*, 松本 幸大**, 齋藤 英二***

Seishi YAMADA, Yukihiro MATSUMOTO and Eiji SAITO

In the seismic area the direct correlation between the strain energy and the axial stress resultants for latticed cylindrical shell structures, has previously been discussed, and an alternative static load modeling associated with the dynamic vibration analytical results has then been proposed. The distribution functions of the previously proposed static seismic load modeling are corresponding to the displacement functions for simple supported shallow shell. In this paper, an alternative static load modeling procedure using the continuum shell analogy has been proposed. The adopted analytical parameters are of the section size of roof members, the horizontal resistance of sub-structure and the total weight of sub-structure. It has been suggested that the present seismic load modeling procedure contributes to the simplicity of seismic design for shell-like space frames.

Keywords : *Latticed Cylindrical Shell Structure, Seismic Response, Continuum Shell Analogy, Static Seismic Loading Model*

円筒ラチスシェル構造, 地震応答, 連続体置換, 静的地震荷重

1. 序論

空間構造物は、災害時の緊急避難場所や復旧のための施設として利用される期待が大きい。すなわち、過大な地震入力に対しても十分な耐力を確保しておくことが必要である。特に、地震に対する地域防災リスクを適切に評価し、信頼性のある被災時復旧体制を早期に確立することが要求されている我が国においては、極めて重要であると言える。しかしながら、空間構造物の耐震規定は、通常の層状構造物に比して整っているとは言えない現状にある。すなわち、空間構造物特有の応答性状である、水平方向地震動入力に対する上下方向応答、また、上下方向地震動入力に対する応答は、現行の耐震規定では考慮されておらず、適切な耐震設計・耐震性能評価を行うためには、このような応答成分を踏まえた静的地震荷重の設定が必要であると言える。

球形ラチス屋根を有する空間構造物に対しては、加藤・中澤らによって、上部構造のデブス・スパン比や下部構造の履歴特性をパラメータとした地震応答性状分析が行われ、応答推定法・等価な質点系への置換法・静的地震荷重設定法が提案されている¹⁻⁵⁾。また、竹内・小河らはモーダルアナリシスに CQC 法を採用し応答推定法を提案するとともに、下部構造の変化による上部構造の応答値を推定するための簡便な応答増幅率評価式を示している^{6,7)}。

本研究で対象とする円筒ラチス屋根構造を有する空間構造物に

関しては、竹内・小河らによって文献^{6,7)}と同様に CQC 法を用いた応答推定法や応答増幅率評価式が示されており⁸⁾、地震応答解析を行うことなく地震時応答特性を評価する研究資料が近年蓄積されつつある。

筆者らは単層円筒ラチス屋根構造を対象に、ラチス部材の断面や桁方向スパン、境界条件、入力地震波をパラメータとした地震応答性状分析を行い、時刻歴応答解析から得られる歪エネルギーに注目することが、その地震時力学性状解明に有用であることを論じた⁹⁾。こうした成果を踏まえ、最大応答加速度に注目するのではなく最大歪エネルギー発生時刻の応答性状を基とした静的地震荷重モデルを提案し、静的解析を行うことによって地震時の最大応答軸力を近似的に予測可能であることを明らかにした^{9,10)}。さらに、最大歪エネルギー発生時刻に注目して静的地震荷重を設定する手法は、ラチス屋根構造のみの場合だけでなく下部構造を有する単層円筒ラチスシェル構造にも適用可能であることを示した^{11,12)}。すなわち、筆者らはこれまでに、単層円筒ラチスシェル構造物の静的地震荷重分布形状及びその大きさの設定に関して、地震応答解析から得られる最大歪エネルギー発生時刻を基とすることで合理的な静的地震荷重モデルが作成できることを論じてきた。ところで、こうした地震応答解析から得られる最大歪エネルギー発生時刻の振動性状に注目して設定した静的地震荷重の分布関数は、古典的な単純支持の部分円筒シェルにお

* 豊橋技術科学大学建設工学系 教授・工博

** 豊橋技術科学大学大学院 博士課程・修士(工学)

*** 豊橋技術科学大学大学院 修士課程

Prof., Dept. of Arch. and Civil Eng., Toyohashi University of Technology, Dr. Eng. Graduate Student, Dept. of Mech. and Structural System Eng., Toyohashi University of Technology, M. Eng. Graduate Student, Dept. of Arch. and Civil Eng., Toyohashi University of Technology

いて、(桁方向半波数 m , 円弧方向半波数 n)=(1,2)としたときの境界条件を満たす変位関数に近似することが確認される。すなわち、円筒ラチスシェル構造の応答性状は、古典的な単純支持の部分円筒連続体シェルのそれと極めて関連が深いと考えられる。このことから、上部ラチスシェル構造を連続体として取り扱い、その変位関数を基として応答値の予測や静的地震荷重の評価を行うことは、設計の合理性の観点から極めて有用であると考えられる。

連続体部分円筒シェルの振動問題に関しては、國枝、北村ら^{13,14)}によって、振動特性に対する近似解の提案や不連続な境界条件に対する応力集中の特性に関する研究結果が報告されている。また、山田ら¹⁵⁾は、周辺単純支持された単層円筒ラチスシェル構造に連続体置換を用いて、初期応力による固有振動数の変化を考察し、有限要素解析と良い対応を示すことを明らかにしている。しかしながら、こうした連続体シェルに関する研究資料においては、地震動に対する設計法を視野に含めたものは少ない。また、それらはシェル構造のみを対象とした応答性状・振動特性の分析であり、下部構造を含めたシェルの空間構造物の耐震設計の観点から、応答値予測や静的地震荷重設定法に関する検討を行っている研究資料は極めて少ない現状にある。

近年、空間構造物の応答推定法や静的地震荷重設定法に関する研究成果が蓄積されつつあるが、その多くは質点系への置換や地震荷重設定の過程で、多自由度の固有値問題や時刻歴応答解析を含んでおり、初期設計段階の部材断面決定や耐震性能評価への応用という観点からは困難であると考えられる。このような背景を踏まえて、本研究では、シェルの空間構造物に対して連続体置換法を適用し、その応答性状の理論解に基づいて応答値を予測することを通して、耐震設計に有用な静的地震荷重設定法を示すことを主たる目的とする。本研究では、まず、上部ラチスシェル構造に連続体置換法を用いることで、連続体シェルの支配方程式より、地震時にラチス構造で励起される振動成分を質点系に置換する手法を示す。次に、下部構造の影響を考慮するため、構造物全体を2質点系に置換し、その最大応答予測値と連続体シェルの変位関数から静的地震荷重を設定する方法を示す。最後に、上部ラチス部材、下部構造水平剛性・重量を解析パラメータとした数値解析結果との比較を行い、その適用性について検討する。

2. 静的地震荷重設定法

2.1 静的地震荷重設定法の概要

静的地震荷重の設定は、地震荷重分布と、その大きさの決定の2つに大別できる。本研究では、既往の屋根型単層円筒ラチスシェル構造に対する応答性状分析の結果から設定した静的地震荷重モデル⁹⁻¹²⁾と、古典的な単純支持の部分円筒シェルの変位関数が近似することから、その変位関数を静的地震荷重分布関数として用いる。また、静的地震荷重の大きさの決定には、構造物全体を2質点系モデルとし、モーダルアナリシスから得られる最大応答加速度の推定値を用いる。構造物全体の2質点系へのモデル化は、上部構造と下部構造をそれぞれ1質点系にモデル化することとし、上部構造は連続体置換を、下部構造は水平剛性と重量を基に1質点系にモデル化する。

2.2 全体座標系と変位関数の定義

部分円筒シェルを図1に示す。全体座標系とその変位関数を $\{X, Y, Z\}$, $\{U, V, W\}$ とし、円筒座標系でのそれらを $\{x, y, z\}$, $\{u, v, w\}$ とする。各々の変位関数は座標変換マトリクスを用いて次式のように表される。

$$\begin{Bmatrix} U \\ V \\ W \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (1)$$

なお、 θ は y 方向に関する次式の関数である。

$$\theta = \frac{\phi}{R_y} y - \frac{\phi}{2} \quad (2)$$

ここで、 ϕ は部分円筒シェルの開角、 R_y は円弧長である。

また、本研究では以下の仮定を用いている。

- 1) ラチスシェルは単純支持とする
- 2) ラチスシェルの質量は均一とする

本研究では、単層円筒ラチス構造の円弧方向への地震入力の場合について述べるが、上下動に対しても全く同様の手順で静的地震荷重の設定が可能である。

図1 部分円筒シェルと座標系

2.3 単層ラチス構造の直交異方性連続体置換

ラチスシェルの直交異方性連続体置換法は、文献15)を参考に以下の手順により行う。図2に示すような3方向の部材から構成されている円筒ラチスシェルを想定する。円筒座標系は (x, y) であり、各部材 i の部材座標系を (ξ_i, ψ_i) 、その傾きを ϕ_i 、部材間隔を s_i とする。

図2 ラチスシェルの部材座標系

面内合応力 $\{N_{\xi i}\}$ は,

$$\begin{Bmatrix} N_{\xi i} \\ N_{\psi i} \\ N_{\xi\psi i} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_i A_i / s_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{\xi i} \\ \varepsilon_{\psi i} \\ \varepsilon_{\xi\psi i} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

と表される。上式を

$$\{N_{\xi i}\} = [E_{\xi i}] \{\varepsilon_{\xi i}\} \quad (4)$$

とおく。ここで、 $E_{\xi i}$ は部材 i のヤング係数、 A_i は断面積である。

曲げモーメント $\{M_{\xi i}\}$ は,

$$\begin{Bmatrix} M_{\xi i} \\ M_{\psi i} \\ M_{\xi\psi i} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_i I_i / s_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_i J_i / 4s_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_{\xi i} \\ \kappa_{\psi i} \\ \kappa_{\xi\psi i} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

であり,

$$\{M_{\xi i}\} = [D_{\xi i}] \{\kappa_{\xi i}\} \quad (6)$$

とおく。ここで、 I_i は部材 i の断面 2 次モーメント、 J_i は振り剛性、 G_i は剪断弾性係数であり、ポアソン比を ν_i とすると次式である。

$$G_i = E_i / 2(1 + \nu_i) \quad (7)$$

次に、各部材座標系 (ξ, ψ) で表された合応力、歪を円筒座標系 (x, y) に変換する。すなわち,

$$\{N_{xi}\} = [T_{Ni}] \{N_{\xi i}\} \quad (8)$$

$$\{\varepsilon_{xi}\} = [T_{ei}] \{\varepsilon_{\xi i}\} \quad (9)$$

ここで,

$$\{N_{xi}\} = \{N_{xi} \quad N_{yi} \quad N_{xyi}\}^T \quad (10)$$

$$\{\varepsilon_{xi}\} = \{\varepsilon_{xi} \quad \varepsilon_{yi} \quad \varepsilon_{xyi}\}^T \quad (11)$$

$$[T_{Ni}] = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi_i & \sin^2 \phi_i & 2\sin \phi_i \cos \phi_i \\ \sin^2 \phi_i & \cos^2 \phi_i & -2\sin \phi_i \cos \phi_i \\ -\sin \phi_i \cos \phi_i & \sin \phi_i \cos \phi_i & \cos^2 \phi_i - \sin^2 \phi_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[T_{ei}] = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi_i & \sin^2 \phi_i & \sin \phi_i \cos \phi_i \\ \sin^2 \phi_i & \cos^2 \phi_i & -\sin \phi_i \cos \phi_i \\ -2\sin \phi_i \cos \phi_i & 2\sin \phi_i \cos \phi_i & \cos^2 \phi_i - \sin^2 \phi_i \end{bmatrix} \quad (13)$$

である。これらを用いて、円筒座標系における要素剛性マトリクスを算出する。すなわち,

$$\{N_{xi}\} = [T_{Ni}] [E_{\xi i}] [T_{ei}]^{-1} \{\varepsilon_{xi}\} = [E_{xi}] \{\varepsilon_{xi}\} \quad (14)$$

$$\{M_{xi}\} = [T_{Ni}] [D_{\xi i}] [T_{ei}]^{-1} \{\kappa_{xi}\} = [D_{xi}] \{\kappa_{xi}\} \quad (15)$$

最後に、各要素の剛性マトリクスを重ね合わせ全体剛性マトリクス（構成則）を得る。

$$[E_x] = \sum_i [E_{xi}] = \begin{bmatrix} C_x & C_p & 0 \\ C_p & C_y & 0 \\ 0 & 0 & C_{xy} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[D_x] = \sum_i [D_{xi}] = \begin{bmatrix} D_x & D_p & 0 \\ D_p & D_y & 0 \\ 0 & 0 & D_{xy} \end{bmatrix} \quad (17)$$

2.4 支配方程式

薄肉偏平シェルの釣合式は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + \frac{N_x}{R_x} + \frac{N_y}{R_y} &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、 R_x は x 方向曲率半径、 R_y は y 方向曲率半径、 ρ はシェルの単位面積あたり質量である。上式に前節で導いた(16)、(17)式の構成則を代入すると次式の支配方程式を得る。

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{12} & L_{22} & L_{23} \\ L_{13} & L_{23} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -\rho & 0 & 0 \\ 0 & -\rho & 0 \\ 0 & 0 & \rho \end{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (19)$$

ここで、上式第 1 項の成分は次式である。

$$\begin{aligned} L_{11} &= C_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} + C_{xy} \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad L_{12} = (C_p + C_{xy}) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \\ L_{13} &= -\left(\frac{C_x}{R_x} + \frac{C_p}{R_y} \right) \frac{\partial}{\partial x}, \quad L_{22} = C_{xy} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + C_y \frac{\partial^2}{\partial y^2} \\ L_{23} &= -\left(\frac{C_p}{R_x} + \frac{C_y}{R_y} \right) \frac{\partial}{\partial y} \\ L_{33} &= D_x \frac{\partial}{\partial x^4} + (2D_p + 4D_{xy}) \frac{\partial}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial}{\partial y^4} - \frac{C_x}{R_x^2} - 2 \frac{C_p}{R_x R_y} - \frac{C_y}{R_y^2} \end{aligned} \quad (20)$$

2.5 古典単純支持に対する厳密解

本研究では、上部ラチス構造を古典単純支持とみなす。この境界条件を満足する変位関数は次式のように表される。

$$\begin{aligned} u &= u_{mn} \cos \frac{m\pi x}{L_x} \sin \frac{n\pi y}{R_y} \sin \omega t \\ v &= v_{mn} \sin \frac{m\pi x}{L_x} \cos \frac{n\pi y}{R_y} \sin \omega t \\ w &= w_{mn} \sin \frac{m\pi x}{L_x} \sin \frac{n\pi y}{R_y} \sin \omega t \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 L_x は x 方向スパン、 R_y は y 方向円弧長、 m, n は x, y 方向半波数、 ω は円振動数、 t は時間である。上式を、(19)式の支配方程式に代入すると、 m, n 波の振動モードに対する次式の固有値問題を求める。

$$\begin{bmatrix} L_{11}^+ - \Theta^2 & L_{12}^+ & L_{13}^+ \\ L_{12}^+ & L_{22}^+ - \Theta^2 & L_{23}^+ \\ L_{13}^+ & L_{23}^+ & L_{33}^+ - \Theta^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{mn} \\ v_{mn} \\ w_{mn} \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (22)$$

ここで,

$$\Theta^2 = \omega^2 \rho = (2\pi f)^2 \rho$$

である。また、 $L_{11}^+ \sim L_{33}^+$ は、(19)式に(21)式を代入し、偏微分を実行して得られる、 m と n を含む定数である。本研究では、面内の慣性項を省略し、次式のように扱うこととする。

$$\begin{bmatrix} L_{11}^+ & L_{12}^+ & L_{13}^+ \\ L_{12}^+ & L_{22}^+ & L_{23}^+ \\ L_{13}^+ & L_{23}^+ & L_{33}^+ - \Theta^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{mn} \\ v_{mn} \\ w_{mn} \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (23)$$

この場合、面外振動に関する固有振動数は、次式のように極めて簡単に求めることができる。

$$\Theta^2 = L_{33}^+ + \frac{2L_{12}^+L_{13}^+L_{23}^+ - (L_{13}^+)^2L_{22}^+ - L_{11}^+(L_{23}^+)^2}{L_{11}^+L_{22}^+ - (L_{12}^+)^2} \quad (24)$$

また、上式の解を(22)式に代入し、固有ベクトル $\{u_{mn} \ v_{mn} \ w_{mn}\}^T$ が求まる。

2.6 厳密解から得られる有効質量比

いま、 m, n 波の振動モードに対する固有ベクトル $\{u_{mn} \ v_{mn} \ w_{mn}\}^T$ が求まったとする。すると、円筒座標系における固有振動モードは次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} u &= u_{mn} \cos \frac{m\pi x}{L_X} \sin \frac{n\pi y}{R_Y} \\ v &= v_{mn} \sin \frac{m\pi x}{L_X} \cos \frac{n\pi y}{R_Y} \\ w &= w_{mn} \sin \frac{m\pi x}{L_X} \sin \frac{n\pi y}{R_Y} \end{aligned} \quad (25)$$

上式を(1)式に代入し、直交座標系で表すと、

$$\begin{aligned} U &= u \\ V &= v \cos \theta - w \sin \theta \\ W &= v \sin \theta + w \cos \theta \end{aligned} \quad (26)$$

上式より、 m, n モードに対する Y 方向刺激係数 β_{ymn} は、

$$\beta_{ymn} = \frac{\iint \{V(x, y) m_{RY} dx dy\}}{\iint \{V(x, y)\}^2 m_{RY} dx dy} \quad (27)$$

ここで、 m_{RY} はラチスシェルの Y 方向単位面積当り質量である。(27)式を計算すると、 $(m, n) = (\text{奇数}, \text{偶数})$ 以外の場合 0 となる解が得られ、既往のラチス屋根構造に対する有限要素法を用いた非減衰自由振動解析結果と一致していることが確認される。さらに、

$$\iint \{V(x, y)\}^2 m_{RY} dx dy = L_X R_Y m_{RY} ; \text{総質量} \quad (28)$$

と正規化することで、

$$L_X R_Y m_{RY} \beta_{ymn}^2 = m_{RYmn} \quad (29)$$

で表される m, n モードの有効質量を得る。

2.7 1,2 モードに対する 2 質点系への置換と静的地震荷重の作成

筆者らは、文献9)において最大歪エネルギー発生時刻に注目すると、ラチスシェル屋根の卓越振動モードは $(m, n) = (1, 2)$ であることを示した。従って、 $(m, n) = (1, 2)$ の固有モードにのみ注目し、静的地震荷重の設定を行う。すなわち、図3のように1,2モードの有効質量 m_{RY12} と、(24)式から求まる固有振動数 f_{R12} を用いて1,2モードの剛性 k_{R12} を算出し、1質点系とする。1,2モード以外の振動モードの有効質量は、剛体に近い振動モードであると見なし下部構造の質量に加算

する。下部構造は、水平剛性 k_S と下部構造総質量 m_S より1質点系に置換する。以上の手順より、2質点系の非減衰自由振動方程式を得る。

$$\begin{bmatrix} m_{RY12} & 0 \\ 0 & m_{S1} \end{bmatrix} \{\ddot{Y}\} + \begin{bmatrix} k_{RY12} & -k_{RY12} \\ -k_{RY12} & k_{RY12} + k_S \end{bmatrix} \{Y\} = \{0\} \quad (30)$$

ここで、

$$m_{S1} = (L_X R_Y m_{RY} - m_{RY12}) + m_S \quad (31)$$

(30)式より、上部ラチスシェルの1,2モードで振動する場合の2つの固有モード(固有ベクトル) $\{u_1^*\}, \{u_2^*\}$ 、刺激係数 β_1^*, β_2^* を算出できる。算出した固有モード、刺激係数に対してモーダルアナリシスを適用し応答値を推定する。得られた応答予測値が最大値となるよう、(26)式を正規化し、 Y, Z 方向の静的地震荷重とする。なお、 Y 方向の剛体振動成分を考慮するため Y 方向静的地震荷重に関しては(26)式より定められる値に、2質点系モデルから得られた下部構造の応答値を一様に加算する。

図3 2質点系へのモデル化の概要

3. 提案した静的地震荷重の精度

3.1 解析モデル

前章で示した手法を用いて設定した静的地震荷重の合理性を検討するため、地震応答解析結果との比較を行う。

図4 解析モデル

表1 解析モデル形状

X方向スパン L_X [m]	24.4
Y方向スパン L_Y [m]	23.4
ライズ H [m]	3.14
曲率半径 R_Y [m]	23.4
開角 ϕ [deg.]	60
支承部高さ H_S [m]	0.5
下部構造高さ H_Z [m]	3.0

表2 ラチス部材

	D ₁	D ₂
部材長 [cm]	203.3	
外径×厚 [mm]	101.6×2.3	165.2×4.5
断面2次モーメント I [cm ⁴]	120	734
細長比 λ	58.42	35.79
等価殻厚 t_e [cm]	13.53	22.07
シェルとしての径厚比 R_y/t_e	173	106

表3 基準とした解析モデルの重量[kN]

ラチス部材	D ₁	D ₂
上部ラチス構造重量	390.1	491.8
下部構造重量	155.6	161.7

解析モデルは図4、表1に示す単層円筒ラチスシェル屋根を有する空間構造物である。解析パラメータは、ラチス部材断面、下部構造水平剛性、下部構造重量とした。上部ラチス部材断面は、表2に示す2種類とした。下部構造の水平剛性はベースシア係数0.2に対して柱頂部の層間変位が $H_z/200$ となるように設計されたモデルを基準として、質量は変化させることなく、水平剛性倍率 C_S を0.1, 0.5, 2.0, 10としたモデル、さらにそれぞれに対して下部構造重量倍率 C_{MS} を0.5, 2.0, 10としたモデルを作成した。境界条件は、柱下端を固定支持とした。基準とした解析モデル($C_S=1.0$, $C_{MS}=1.0$)の節点重量は構造部材自重と、仕上げ材重量として上部構造 0.49kN/m²、下部構造 0.39kN/m²とし、集中質量として考慮している。表3に基準とした解析モデルの上部ラチス構造と下部構造重量を示す。

3.2 入力地震波

入力地震波は安全限界レベルの加速度応答スペクトルに第2種地盤の増幅係数 G_S と減衰定数 $h=2\%$ の修正率 F_h をかけたものを目標スペクトルとし、入力地震波を作成した。位相波は、Kobe-NS, EW, El

図5 入力地震波の加速度応答スペクトル

Centro-NS, EW を用い、計4波作成した。図5に目標スペクトルと人工地震波のスペクトルを示す。

3.3 静的地震荷重モデル

2章で述べた手法を用いて、静的地震荷重を設定する。本研究では、応答値予測に、次式で表される絶対値和(ABS)と2乗和平方(RSS)との平均値(AVE)を用いた¹⁶⁾。

$$A_k^{AVE} = \frac{1}{2} (A_k^{ABS} + A_k^{RSS}) \quad (32)$$

ここで、

$$A_k^{ABS} = \sum_{j=1}^2 |\beta_j * \times_k u_j * \times S_A(T_j)| \quad (33)$$

$$A_k^{RSS} = \sqrt{\sum_{j=1}^2 |\beta_j * \times_k u_j * \times S_A(T_j)|^2}$$

である。また、 j はモード次数、 k は層番号であり、ラチス屋根を2、下部構造を1とする。従って、節点 i の Y, Z 方向静的地震荷重 P_{Yi}, P_{Zi} は次式で表される。

$$P_{Yi} = m_i \{ A_2^{AVE} (v * \cos \theta - w * \sin \theta) + A_1^{AVE} \}$$

$$P_{Zi} = m_i \{ A_2^{AVE} (v * \sin \theta + w * \cos \theta) \} \quad (34)$$

ここで、 v, w は、固有ベクトル $\{u_{mn} \ v_{mn} \ w_{mn}\}^T$ を(25)式に代入した後、最大値1で正規化した静的地震荷重分布関数であり、 m_i は節点質量である。

図6に $C_{MS}=1.0$ のモデルに対する Y, Z 方向静的地震荷重分布を示す。いずれの静的地震荷重分布形状とも、文献9-12)で示した、地震応答解析から得られる最大歪エネルギー発生時刻の変形モードを基に設定した静的地震荷重分布と同様の分布形状であることから、地震入力による力学特性や応答性状と合致した静的地震荷重であると言える。 $C_S=0.1$ のモデルについては、静的地震荷重が他のモデルに比べて非常に小さくなっている。これは、下部構造の水平剛性が極端に小さいモデルを設定したため、下部構造全体が免震層のような作用となっていることを示している。

図7は、設定した全ての解析モデルについて、地震応答解析により得られた軸力 N_{DY} と、静的地震荷重を用いた線形応力解析結果か

◆: $C_S=0.1$, ◇: $C_S=0.5$, ●: $C_S=1.0$, □: $C_S=2.0$, ■: $C_S=10$

図6 $C_{MS}=1.0$ のモデルに対する静的地震荷重分布

図7 地震応答解析結果から得られた最大応答軸力 N_{DY} と静的地震荷重を用いた静的解析から得られた軸力 N_{ST} との比較

ら得られた軸力 N_{ST} を比較したものである。すなわち、図中の上側に示した C_S 、左側に示したラチス部材と C_{MS} に対応する解析モデルの比較結果を示している。各グラフの縦軸は地震応答解析により得られた軸力 N_{DY} 、横軸は静的地震荷重を用いた線形応力解析結果から得られた軸力 N_{ST} を全ラチス部材についてプロットしたものである。なお、各部材の最大応答軸力は入力地震波 4 波の最大値であり、各々の軸力には固定荷重による軸力が加算されている。図 7 より、各々の軸力はよく対応しており、本研究で提案した静的地震荷重は円筒ラチスシェル構造物の応答性状を合理的にモデル化できていると言える。特にラチス部材 D_1 で $C_S=0.1, 0.5$ のモデル、ラチス部材 D_2 で $C_S=0.1, 0.5, 1.0, 2.0$ のモデルでは各図中央の直線周辺にプロット点が集中しており、作成した静的地震荷重によって精度良く最大応答軸力が推定できていると言える。しかしながら、下部構造の水平剛性が高くなることと、その重量が小さくなるにつれてプロットの幅が大きくなる傾向にある。これらは本研究で対象とした 1,2 モード以外の高次モードの振動成分が励起されたためであると考えられる。こうした高次の振動成分の軸力への影響は、低次の振動モードである 1,2 モードのそれに比して小さいものの、最大応答軸力を低減するのに寄与しており、結果として本研究で提案した静的地震荷重は安全側の評価となっている。

4. 結論

本研究では、単層屋根型円筒ラチスシェルを有する空間構造物を対象に、上部円筒ラチスシェル構造に連続体置換法を適用し、容易な計算手順で設定が可能な静的地震荷重設定法を示した。さらに、上部ラチス部材、下部構造水平剛性を解析パラメータとした数値解析結果との比較を行い、その適用性について考察した。その結果、以下の点に要約できる。

- 1) 古典的な単純支持の部分円筒シェルの $(m, n)=(1, 2)$ に対応する変位関数は、単層円筒ラチスシェル構造の地震応答解析から得られる最大歪エネルギー発生時刻での振動モードに近似する。
- 2) 円筒ラチスシェル構造に連続体置換法を適用し、 m, n モードでの振動に対する 2 質点系へのモデル化手法を提案した。
- 3) 1,2 モードでの振動に注目して置換した 2 質点系モデルにモード重合法を用いて、1,2 モードでの振動に対する応答値推定手法を示した。
- 4) 古典的な単純支持の部分円筒シェルの変位関数と、2 質点系モデルを用いて推定した応答値に基づいて、合理的かつ簡便な静的地震荷重モデルを提案した。
- 5) 本研究で検討した解析モデルの範囲では、提案した静的地震荷重モデルを用いた静的解析から得られた部材軸力と、地震応答解析から得られた最大応答軸力とを比較した結果、各々の相関性は極めて高く、提案した静的地震荷重設定法を用いることで地震時に生ずる部材力を近似的に予測可能であることを明らかにした。

本研究では、上部ラチス構造に対して、円弧方向の地震動入力に対する 1,2 モードの振動成分のみを扱ったが、他の高次モードを考慮する場合や、 $(m, n)=(奇数, 奇数)$ の振動モードが励起される上下動に対する静的地震荷重の設定も本報で示した手法と全く同様にして静的地震荷重の設定を行うことが可能である。こうした分析に関しては今後の課題とするが、本研究で示した連続体置換法を用いた

静的地震荷重設定法は、シェルのな立体骨組構造物の地震時の応答特性評価や初期設計段階での部材断面決定、耐震設計法等への工学的有用性・発展性が大いに期待できると言える。

謝辞

本研究は、豊橋技術科学大学の 21 世紀 COE 拠点形成プログラム「未来社会の生態恒常性工学」の一部として行われたものである。

参考文献

- 1) 加藤史郎, 打越瑞昌, 大杉文哉, 中澤祥二, 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 下部構造の剛性と質量の影響について, 日本建築学会構造系論文集 第525号, pp.71-78, 1999.11
- 2) 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
- 3) 中澤祥二, 加藤史郎: 下部構造降伏型単層ラチスドームの地震応答推定法, 鋼構造年次論文報告集 第10巻, pp.391-398, 2002.11
- 4) 加藤史郎, 小西克尚: ラチスドームの Push-over analysis に基づく地震応答推定に関する一考察 1 次モード支配型の空間構造物に対する検討, 日本建築学会構造系論文集 第561号, pp.153-160, 2002.11
- 5) 加藤史郎, 小西克尚, 中澤祥二, 倉本洋: ラチスドームの Push-over analysis に基づく地震応答推定に関する一考察 2 つのモードが支配型な空間構造物に対する検討, 日本建築学会構造系論文集 第569号, pp.89-96, 2003.7
- 6) 竹内徹, 小河利行, 中川美香, 熊谷知彦: 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 第579号, pp.71-78, 2004.5
- 7) 竹内徹, 小河利行, 中川美香, 熊谷知彦: 弾塑性架構で支持された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596号, pp.49-56, 2005.10
- 8) 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 第596号, pp.57-64, 2005.10
- 9) 山田聖志, 松本幸大, 加藤史郎: 屋根型単層円筒ラチスの地震動による応答性状と静的地震荷重に関する考察, 鋼構造協会鋼構造論文集 第11巻 第41号, pp.33-46, 2004.3
- 10) 山田聖志, 松本幸大: 屋根型円筒ラチスシェルの静的地震荷重に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), Vol.B-1, pp.869-870, 2004.8
- 11) 斎藤英二, 山田聖志, 松本幸大: 屋根型円筒ラチスシェルの応答性状に及ぼす下部構造の影響と静的地震荷重, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), Vol.B-1, 2005.9
- 12) Seishi YAMADA, Yukihiko MATSUMOTO and Eiji SAITO: Seismic Response Behavior of Single Layer Latticed Cylindrical Roofs and the Load Modeling for Seismic Design, Proceedings of International Symposium on Shell and Spatial Structures, pp.399-406, 2005.9
- 13) 國枝次郎, 北村幸嗣, 小山傑: 部分円筒シェルの厳正解による振動特性と近似解, 日本建築学会構造系論文集 第513号, pp.121-125, 1998.11
- 14) 北村幸嗣, 國枝次郎: 部分円筒シェルの不連続な境界条件部における応力集中の特性, 日本建築学会構造系論文集 第532号, pp.119-126, 2000.6
- 15) 山田聖志, 竹内明子: シェルの構造物の自由振動特性に及ぼす初期応力の影響に関する推定法, 日本建築学会構造系論文集 第464号, pp.91-99, 1994.10
- 16) 柴田明徳: 最新耐震構造解析, 最新建築学シリーズ9, 森北出版, 1981.6
- 17) 山田大彦: シェル空間構造セミナー資料, 日本建築学会, pp.65-77, 2001.11
- 18) 竹内徹: 2005年度日本建築学会 構造部門 (シェル・空間構造) パネルディスカッション資料, 日本建築学会, pp.28-39, 2005.9

- 19) 竹内明子, 山田聖志, 多田敬幸: 単層円筒ラチスシェル屋根を有する鋼構造物の
地震応答性状, 鋼構造協会鋼構造論文集 第6巻 第23号, pp.91-98, 1999.9
- 20) 日本建築学会: 屋根型円筒ラチスシェル構造の解析・設計, 日本建築学会, 1995
- 21) 鈴木勝義, 成田吉弘, 齊藤俊, 山田聖志 他: シェルの振動と座屈ハンドブック,
日本機械学会, 2003.1

(2006年5月9日原稿受理, 2006年9月12日採用決定)