逆対称荷重を受ける屋根型円筒ラチスシェルの座屈荷重

BUCKLING LOADS OF CYLINDRICAL LATTICE SHELL ROOFS UNDER ANTISYMMETRIC LOADINGS

木内佑輔^{*},竹内 徹^{**},熊谷知彦^{***},小河利行^{****} Yusuke KINOUCHI, Toru TAKEUCHI, Tomohiko KUMAGAI and Toshiyuki OGAWA

Buckling behavior of latticed cylindrical shell roofs under uniformly distributed loads has various past researches; however, the stability under seismic responses has not made clear enough yet. In this paper, buckling behavior of latticed cylindrical shell roofs under equivalent static seismic loads is discussed including the effects of geometrical and material non-linearity. The characteristics are compared with those under uniformly distributed loads, and the possibility for estimating the seismic stability from uniform-load stability is discussed.

Keywords: Anti-symmetric Loadings, Cylindrical Lattice Shell Roofs, Static Seismic Loadings, Elasto-plastic Buckling Analysis, Modified Dunkerley Formula, Buckling Load Factor

逆対称荷重、円筒ラチスシェル、静的地震荷重、弾塑性座屈解析、修正ダンカレー式、座屈荷重係数

1. 序

均等分布荷重を受ける円筒ラチスシェルの座屈挙動に関しては古 くから多くの研究が行われてきた。離散部材を有効強度、有効剛性 を有する連続体に置換して解析解により応力・変形を求める手法に 始まり¹⁾、有限要素法の発達に伴い幾何学的非線形性、材料非線形 性を考慮した座屈荷重の評価を行うことも容易になった²⁾。円筒ラ チスシェル屋根は1方向のみの曲率を有し2方向のガウス曲率を有 するラチスドームと比較して非均等荷重に対する変形が過大になり 易く強い幾何学的非線形性を有する。このため、加藤ら³⁾は積雪荷 重を想定した偏載荷重に対する円筒ラチスシェルの座屈荷重につい て研究を行っている。また、円筒形を含む様々な形状のラチスシェ ル構造に対し、線形座屈荷重に対する初期不整・幾何学的非線形性 を考慮した座屈荷重の低下率を「ノックダウンファクター」と定義 しその評価式を提案し⁴⁾、修正ダンカレー式を用いることで、材料 非線形性を考慮した座屈荷重を容易に求める方法を提案している。

単層円筒ラチスシェル屋根の地震時の挙動については山田ら⁵⁾の 一連の研究により明らかにされてきた。これらの研究によると、梁 間方向に地震入力を受ける単層円筒ラチスシェル屋根は、水平地震 入力に対しても鉛直応答を含む複雑な応答を示すことが分かってい る。山田らは RS 法に基づく初期不整付きラチスシェル屋根の座屈 荷重評価法についても多くの提案を行っている⁶⁾。筆者ら⁷⁾⁸⁾は円 筒ラチスシェル屋根について、デプス/スパン比が 1/50 程度以上の 面外剛性の高い円ラチスシェルについては、地震時の振動モードが 比較的単純化され逆対称モードで表現できることを示し、応答増幅 率による地震時応答を模擬した等価静的地震荷重の提案を行ってき た。同手法では屋根部と下部構造(等価1質点系)との固有周期比 R_t の関数によって与えられる応答増幅率 F_R と等価1質点系の水平応 答加速度 A_{eq} を乗じた上で、予め定められた屋根面の水平加速度分 布、鉛直加速度分布を最大値が $A_{eq} \times F_R$ となるように加えるもので、 幾何学的非線形性解析結果との比較により有効性が確認されてきた。

一方、地震応答下のラチスシェルの座屈問題については、まだ不 明な点が多い。熊谷ら⁹⁾は地震波を模擬した鉛直および水平方向の ステップ波を受ける単層ラチスドームの動的座屈性状に関する一連 の研究を行っているが、入力位相に依存するラチスシェルの動的座 屈性状は一般的に複雑であり形状パラメータの影響を把握すること が難しい。そこで本研究では、地震応答下の安定性を論じる初期段 階として、地震荷重分布を模擬した逆対称静的荷重下の円筒ラチス シェルの座屈特性について詳細に調査する。また、座屈荷重や幾何・ 材料非線形性の影響を均等分布荷重による値と比較することで、均 等分布荷重下の座屈安全性検討の読替の可能性について考察する。

 **
 東京工業大学大学院大学院生
 Graduate Student, Tokyo Institute of Technology

 **
 東京工業大学大学院理工学研究科 建築学専攻 教授・博士(工学)
 Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

 東京工業大学大学院理工学研究科 建築学専攻 助教・博士(工学)
 Assist. Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

**** 東京工業大学 大学院理工学研究科 建築学専攻 教授・工博

Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

2. 解析概要

2.1 解析モデル

解析モデルは図1に示すスパンL_r=36mの屋根型円筒ラチスシェ ルとする。表1に示すように、桁行スパンL_vは24m.36m.48m.96m の4種類とし、スパン比 L₁/L_xによって 0.7,1.0,1.3,2.7 と表記する。 境界条件は、外周節点すべてピン支持の Sp モデルと、四隅および 妻面はピン支持で桁面のみx方向ローラー支持のSrモデルの2種類 とする。

表2に示すように部材は円形鋼管とし、ラチス材は節点間の細長 比 λ が 50, 70, 100 の均等断面,境界部材は固定荷重下で部材応力 が一様となる様設計する。個材座屈を考慮し部材には中間節点を設 け、弾塑性部材の材料特性は表3に示すようにbi-linear型とする。 固定荷重は構造材重量, 仕上げ材重量, 吊荷重などを考慮し, 1.18kN/m²とし、支配面積に応じて各節点に質量を与える。

解析方法は、線形座屈解析、幾何学的非線形性を考慮した弾性座 屈解析,幾何学的非線形性および材料学的非線形性を考慮した弾塑 性座屈解析の3種類とする。線形座屈解析では、微小変形時の最小 座屈固有値に対応する荷重を線形座屈荷重 P_c^{lin}と定義する。弾性座 屈解析では、荷重と推定座屈荷重が一致する座屈分岐点を、座屈分 岐点が認められない場合は推定座屈荷重が極小値を示す荷重を弾性 座屈荷重 P_c^{el}と定義する。弾塑性座屈解析では、荷重-変位関係の最 初の最大荷重点を座屈点とみなし,弾塑性座屈荷重P^{pl}と定義する。 ただし、各変形状態における荷重と座屈固有値の積を推定座屈荷重 とする。

2.2 荷重

荷重は、固定荷重に比例した等分布荷重および静的地震荷重に比 例した逆対称荷重(鉛直成分)とする。逆対称荷重は、既往の研究 ⁸⁾において提案されている,水平地震波入力時の応答加速度分布式 を用いて、入力荷重を決定する。なお屋根面のみの場合、応答加速 度分布は式(1)のように与えられ、応答加速度と節点質量の積を、 各節点に逆対称鉛直荷重として与える。図1に示すように、等分布 荷重下では中央節点 O, 逆対称荷重下では最大の鉛直下向荷重が与 えられる節点を参照節点とし,以下では同節点の挙動に着目し,座 屈時の参照節点荷重を座屈荷重とする。

$$A_{RV}(x, y) = S_{Ap}C_{V}\theta\sin\pi\left(\frac{2x}{L_{x}}\right)\cos\pi\left(\frac{y}{L_{y}}\right)$$
ここに、 S_{Ap} :加速度応答スペクトル最大値

 C_{ν} :比例係数

A : 半開角

: x 方向スパン(梁間方向) L

3 線形座屈解析による基本性状

図2に各モデルの線形座屈荷重を示す。等分布荷重下に対し,逆 対称荷重下では2倍程度の線形座屈荷重となる。共通して,スパン 比L_v/L_xと部材細長比λが大きくなるに従って線形座屈荷重が低下す る傾向が見られる。ピン支持とローラー支持で比較すると、等分布 荷重下ではほぼ同等の線形座屈荷重を示すのに対し、逆対称荷重下 の特に λ=50 のモデルでは、スパン比 L_v/L_xが大きくなるに従って、 ローラー支持の方が大きな線形座屈荷重を示す。



表1 形状諸元

モデル名	Sp30L0.7\lambda x	Sp30L1.0\lambdax	Sp30L1.3\lambda	Sp30L2.7\lambda x				
x 方向スパン Lx (m)	36							
y 方向スパン L _y (m)	24	36	48	96				
半開角 θ(°)	30							
曲率半径 R (m)	36							
$\overline{\partial} \mathcal{A} \mathcal{I}_{R}(\mathbf{m})$	4.82							

表 2 部材諸元 外径

D (mm

232.0

165.7

116.0

558.8

355.6

1016.0

1907

厚さ

t (mm

5.8

4.1

29

15.0

11.0

20.0

4.0

4000

1450~4823

部材細長比

50

70

100

163

46.7~51.3

11.4

22.0~73.1

ラチス材

妻面ア・

妻面梁

桁行纲

東材

境

材

(1)

		表 3	材料	特性
)	長さ <i>L</i> (mm) 4000	ヤング係数 E (N/mm ²)		2.06×1
	4000 4000 3141	ひずみ硬化勾配 <i>E</i> ₁ (N/mm ²)		2.06×1
	5687~6251	降伏広う	日度	

2.06×10

 2.06×10^{3}

295

 $\sigma_{\rm v}({\rm N/mm^2})$









線形座屈解析による軸力分布を図3に示す。等分布荷重下の場合, 斜材に生じる圧縮力が支配的な応力状態となり,ローラー支持の場 合は四隅に軸力が集中する傾向が見られた。ここには示していない が, *L*₂/*L*xが大きくなるに従ってピン支持の場合では水平材に小さな 引張力が生じるのに対し,ローラー支持の場合では大きな圧縮力が 生じ,四隅の斜材にはさらに軸力が集中する傾向が見られた。

逆対称荷重下の場合,圧縮場と引張場が中央の水平材に関して線 対称に生じる軸力分布となる。水平材から斜材へ,アーチ状に応力 が伝達される。ピン支持と比較すると,ローラー支持の場合に中央 付近の斜材と水平材に軸力が集中するが,等分布荷重下ほど境界条 件による差異は見られない。また, *L*_y/*L*_x を変化させた場合も同様 の性状が見られ,全体として安定した軸力分布を示している。

図4に代表的なモデルの1次座屈モードを示す。等分布荷重下の 場合,梁間方向に3~5,桁行方向に1の半波数を示す全体座屈モー ドとなる。構成部材の節点間で座屈を起こす個材座屈,節点が局部 的に面外方向へ変位する節点座屈のような,局所的な座屈モードは 見られなかった。ここには示さないが,全体として,λが大きいほ ど梁間方向の座屈半波数が増加する傾向が表れた。またLy/Lxが小さ い,短い屋根型円筒ラチスシェルほど座屈半波数が多いモードを示 す。境界条件の違いは,座屈モードには影響しない。

一方,逆対称荷重下の場合,鉛直下向きの荷重が与えられる側の シェル面のみ,大きく波打つ全体座屈モードとなる。等分布荷重下 と同様に,個材座屈,節点座屈は見られない。また,L₂/L_xが異なる モデルでもほぼ同様の形態の座屈モードを示す。

荷重分布で比較すると,同一モデルでは同程度の座屈波長を示す。 一方,先に述べたように軸力分布から逆対称荷重下ではシェル面の 半分が引張場であることがわかる。これより,線形座屈荷重は圧縮 場の比率が反映され,逆対称荷重下では等分布荷重下の2倍程度の 線形座屈荷重になったと考えられる。

4. 弾性座屈解析

4.1 荷重-変位関係

図5に弾性座屈解析における荷重-変位関係を示す。ここではλ=70 のモデルに注目している。等分布荷重下では全てのモデルにおいて, 荷重と推定座屈荷重が一致する明確な座屈分岐点が見られた。また 荷重-変位関係の勾配は徐々に低下していき,推定座屈荷重は緩やか に低下していく傾向も概ね共通している。図5の(Aa)(Ab)に見るよ うに,モデル形状,境界条件によって変位が正となる場合と負とな る場合があるが、ともに対称 1.5 波型の変形モードであり、変形性 状としては類似したものとなる。

逆対称荷重下では、明確な座屈分岐点が見られないモデルもあっ た。等分布荷重下と同様に、荷重-変位関係の勾配が徐々に低下し ていく傾向は共通している。推定座屈荷重は、初期にはかなり大き な値を示すが、変形が進むにつれて大きく低下していき、極値をと った後は変位-荷重関係に沿うような推移を示す。等分布荷重下で は、境界条件が変位に関して大きく影響していたのに対し、逆対称 荷重下ではローラー支持の場合、変位と荷重が僅かに低下する程度 で影響は小さい。ただし、ローラー支持では推定座屈荷重が大きく なる傾向が見られ、Ly/Lxが大きく、λが小さいほどその傾向は顕著 となる。

図6に各モデルの弾性座屈荷重を示す。全体として, L_y/L_xおよび λ が大きくなるに従って座屈荷重が低下する傾向は,線形座屈荷重 と同様である。また, L_y/L_xが小さい短い屋根型円筒ラチスシェルほ ど,逆対称荷重下において等分布荷重下よりも低い座屈荷重を示す 傾向が見られる。境界条件をローラー支持とすると,さらにその傾 向が顕著となる。図7に線形座屈荷重に対する弾性座屈荷重の比を



図5 荷重-変位関係 (弾性, λ=70)



図 8 変形図 (Sx30L1.3λ70, 弾性座屈時, 10 倍)

低減率として示す。等分布荷重下では0.8,逆対称荷重下では0.4程 度の低減率となり、後者の方が幾何学的非線形性の影響を受けやす い荷重分布であることがわかる。また、荷重分布によらず L_y/L_xが大 きいほど低減率も微増する傾向が見られる。

4.2 変形性状

図8に代表的なモデルの弾性座屈時の変形を示す。前節4.1において述べたように、等分布荷重下では変形を対称1.5波型の2つのモードに分類することができる。(Aa)に示す、中央部が大きく鉛直下方に撓むような変形では、境界から2本目もしくは3本目の水平材が僅かに鉛直上方に変位しており、これらの水平材には引張軸力が生じている。他方の(Ab)に示す、桁行方向の境界から2本目もしくは3本目の水平材が大きく鉛直下方に撓み、中央水平材が浮き上がるような変形は、ローラー支持でL_y/L_xが小さいモデルに見られ、中央水平材には引張軸力が生じている。またλが小さいほど変位量が大きく、境界条件がローラー支持の場合にその傾向が顕著である。

逆対称荷重下では、すべてのモデルで荷重分布にそのまま追従 するような、逆対称1波型の変形が見られる。ただし鉛直下向荷重 側の方が大きな変位を示している。*L*_y/*L*_xが小さいモデルでは、λが 小さいほど変位量が大きくなる傾向があるが、スパン比 *L*_y/*L*_xが大 きいモデルでは、細長比λに関係なく同じような変位量を示す。ま た、境界条件によって変形性状が大きく変化することはない。

5. 弹塑性座屈解析

5.1 荷重-変位関係

次に材料非線形性を考慮した弾塑性座屈解析における荷重-変位 関係を図 9 に示す。ここでは λ=70 のモデルに注目している。また 図 10 に各モデルの弾塑性座屈荷重を示す。等分布荷重下では、λ=50 の全てのモデルと、λ=70 でローラー支持の一部のモデルにおいて部 材の降伏が生じたが、その他のモデルは弾性範囲で全体座屈が先に 生じている。λ と L_y/L_xが小さいモデルほど,部材降伏後の推定座屈 荷重の低下は大きく,剛性が大きい屋根型円筒ラチスシェルほど材 料学的非線形性の影響を受けやすいことがわかる。

逆対称荷重下では、全てのモデルにおいて部材の降伏が生じ、初 期降伏も等分布荷重の場合よりも早い段階で生じる。初期降伏を生 じると推定座屈荷重は急激に低下するが、その後も変形は進行し、 荷重も緩やかではあるが上昇する。等分布荷重下に比較し、初期降 伏後に弾塑性座屈荷重に至るまでの変形が大きく、これは先に示し た変形性状や軸力分布から考えて、HP ラチスシェルのように引張



図9 荷重-変位関係 (弾塑性, λ=70)



場が卓越するためだと考えられる。降伏部材も多くなるため,等分 布荷重下に比べ材料学的非線形性による座屈荷重の低減は大きく なる。これより弾性解析に比べ,等分布荷重下よりも逆対称荷重下 の方が低い座屈荷重を示す傾向がより顕著となる。

5.2 部材降伏過程

図 11 に部材降伏過程を示す。ここでは材料学的非線形性の影響 を受けやすい *λ*=50 のモデルに注目して示す。また,降伏部材は初 期降伏から弾塑性座屈荷重に至るまでに,圧縮降伏もしくは引張降 伏した部材を示しており,降伏した順に番号を振って示している。

等分布荷重下では,前節 5.1 において述べたように半分程度のモデルが部材降伏を生じないまま全体座屈に至る。また境界条件と L_y/L_xにより部材降伏過程も異なるが,中央付近で桁行方向に斜材が 連続的に降伏する傾向が見られる。

逆対称荷重下では、等分布荷重下の場合とは異なり、全てのモデ ルにおいて部材降伏が全体座屈に先行する。最大鉛直下向荷重が与 えられる節点周辺の斜材から圧縮降伏し、降伏が進行していくと中 央付近の斜材が引張降伏を起こす。また境界条件に関わらず類似し た降伏過程を示し、細長比 λ が小さいほど降伏部材数は多くなる。

6. 弾塑性座屈荷重の評価

6. 1 修正ダンカレー式による評価

以上の結果を踏まえて、各荷重分布に対する屋根型円筒ラチスシ ェルの弾塑性座屈荷重の評価を試みる。加藤らの研究³⁾においては、 等分布荷重下および偏載荷重下の単層円筒ラチスシェルの弾塑性座 屈荷重の評価を,正規化細長比*1*を用いて行っている。本研究にお いても,同様の手法を用いる。正規化細長比*1*は次式で与えられる。

$$A = \sqrt{N_y / N_{cr}^{lin}} \tag{2}$$

N^{lin}_c は線形座屈解析において最大圧縮応力度を示す部材(以下,特 定部材)の線形座屈軸力, N_yは降伏軸力である。また,線形仮定に よる弾塑性座屈時の推定軸力 N^{pl}_cは式(4)で求まる。

$$N_{cr}^{pl} = (N_0 / P_0) P_{cr}^{pl}$$
(3)

ここで N_0 は、微小変形仮定の下で基準荷重 P_0 に対して特定部材が 示す軸力である。ただし、逆対称荷重下では最大値となる節点荷重 を基準荷重とする。図 12 に弾塑性座屈荷重の評価を示す。横軸に正 規化細長比 Λ 、縦軸に推定軸力 N_{cr}^{pl} を降伏軸力 N_y によって除して示 しており、次式で示される修正ダンカレー式によって評価を行う。

$$\left(\frac{\Lambda^2}{\gamma} \cdot \frac{N_{cr}^{pl}}{N_y}\right) + \left(\frac{N_{cr}^{pl}}{N_y}\right)^2 = 1.0$$
(4)

等分布荷重下では低減率y=0.8の修正ダンカレー式で概ね評価でき, 境界条件によらず同様の分布傾向を示す。一方,逆対称荷重下では 低減率をy=0.4まで低下させた修正ダンカレー式で概ね捕捉でき, ピン支持に比較してローラー支持の方が低い分布となる。前章に示 したように,屋根型円筒ラチスシェルは各荷重分布に対して同程度 の弾塑性座屈荷重を示すが,同式による評価では上記のように逆対 称荷重下の方が低めの評価となる。これは,幾何学的非線形性によ





表4 参照節点における基準荷重

L_y/L_x	0.7	1.0	1.3	2.7
固定荷重 _U P ₀ (kN/node)	13.0	13.4	13.6	14.0
静的地震荷重 $_{A}P_{0}(kN/node)$	12.3	13.1	13.2	13.7

る低減が大きいこと,また等分布荷重下に比べて部材に生じる曲げ モーメントが大きい点等が要因として考えられる。図 13 にピン支持, λ =50 の場合について,特定部材の軸力-曲げモーメント関係を降伏 軸力 N_y ,降伏モーメント M_y により無次元化して示す。逆対称荷重 下の場合,等分布荷重下に比べて初期より曲げモーメントが支配的 となることがわかる。

6.2 座屈荷重係数による評価

本節では、等分布および逆対称荷重下における弾塑性座屈荷重 $_{U}P_{cr}^{pl}$, $_{A}P_{cr}^{pl}$ の基準荷重 P_{0} に対する比を座屈荷重係数とし、これを比 較することで荷重分布と座屈耐力の関係性について評価を試みる。 弾塑性座屈荷重係数を図 14 に示す。等分布荷重では支配面積に応じ た固定荷重 UPo, 逆対称荷重では SAp=1378.4cm/s²としたレベル 2 相 当の入力による静的地震荷重₄P₀を基準荷重とし、これを表4に示 す。図13において太実線で示す傾き1.0の直線に対し、上側のプロ ットであれば、固定荷重に対する評価で地震力に対しても安全側の 評価になることを意味する。同図中には固定荷重に対する評価に比 べて、静的地震荷重に対する評価が最も低いプロットを通る直線も 併せて示している。大半のモデルにおいて両者の比は太実線を下回 り、固定荷重に比べ静的地震荷重の座屈荷重係数が低くなることが 分かる。しかし、両者は各パラメータによらず概ね比例関係を示し、 その下限は勾配 0.75 の直線で捉えることができる。以上より本検討 範囲では同レベルの地震荷重に対する座屈荷重係数は、固定荷重に 対する同係数の 0.75 倍程度として概ね評価できるものと考えられ る。

7. 結

桁行スパンL₃/L_x,境界条件,細長比λをパラメータとした半開角 *θ*=30[°]の円筒ラチスシェルを対象として,等分布荷重および地震応 答を模擬した逆対称1波型の静的地震荷重を入力した際の座屈性状 に関して,線形座屈解析,弾性座屈解析,弾塑性座屈解析によって 分析を行った。また,修正ダンカレー式および座屈荷重係数によっ て弾塑性座屈荷重の評価を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 屋根型円筒ラチスシェルの線形座屈荷重は、逆対称荷重下では 等分布荷重下の2倍程度の値を示す。しかし弾性、弾塑性の場 合はそれぞれ等分布と同程度、および2割程度低い座屈荷重を 示す。両者には良い対応関係が見られ、逆対称座屈荷重を等分 布座屈荷重より推定できる可能性がある。
- 2) 既往の研究 ³にならい,逆対称荷重下における弾塑性座屈荷重 も修正ダンカレー式により評価可能であるが, γ を 0.4 程度ま で低下させる必要がある。また,レベル 2 相当の地震荷重に対 する座屈荷重係数は,固定荷重に対する座屈荷重係数の 0.75 倍 程度で評価できる。

なお,屋根型円筒ラチスシェルはライズによって地震応答が変化し, 水平力も同時に作用する。今回は半開角 **θ=30**°の場合の検討を行っ たが,その他のライズ,鉛直荷重と水平荷重を同時に与える場合の 座屈性状の分析については今後の課題とする。

参考文献

- 空間構造骨組小委員会: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
- 2) 鈴木敏郎,小河利行:屋根型円筒トラスシェルの座屈解析,日本建築学 会論文報告集,第288号,1980.2
- 加藤史郎,飯田稔: 偏載荷重を受ける周辺単純支持された単層円筒ラチス屋根の座屈荷重,日本建築学会構造系論文集,第 486 号, pp.53-62, 1996.8
- 4) 加藤史郎,仁保裕:単層円筒ラチスシェル屋根の部材断面算定に関する 一考察,鋼構造論文集,第15巻,第57号,pp.45-60,2008.3
- 5) 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,鋼構造論文集,第11巻第41号, pp.33-46,2004.3
- 6) 田口孝,山田聖志:単層剛接合屋根型円筒ラチス構造の座屈性状,日本 建築学会大会学術講演梗概集(東海),B分冊,構造11994,pp.1835-1836, 1994.7
- 7) 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
- T.Takeuchi, T.Ogawa, T.Kumagai: Seismic Response Evaluation of Lattice Shell Roofs using Amplification Factors, Journal of the Int. Assoc. for Shell and Spatial Structures, Vol.48(2007), No.3, 2007.12
- 9) 熊谷 知彦,小河 利行:鉛直および水平方向ステップ波を受ける剛接合 単層ラチスドームの動的座屈性状,鋼構造論文集,第 11 巻 42 号 pp.111-120,2004