

2 曲面構成直交格子ドームの座屈性状と座屈荷重

2 曲面の距離・荷重条件による影響

Buckling Behavior and Buckling Load of a New Two-way Dome Constructed by Orthogonal Arches Included in Different Surfaces Stiffened by Diagonal Struts

Effect of curved surface distance and load conditions

○樋口 直也*¹, 中澤 祥二*²

Naoya HIGUCHI*¹, Shoji NAKAZAWA*²

*1 福井工業高等専門学校環境都市工学科 助教 博士(工学)

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, National Institute of Technology Fukui College, Ph.D.

*2 豊橋技術科学大学建築・都市システム学系 教授 博士(工学)

Professor, Department of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology, Ph.D.

Summary: This paper proposes a new two-way dome and investigates the effectiveness of the new two-way dome stiffened by a diagonal bracing system. The dome is composed as two orthogonal arches situated at different level. The two sets of surfaces are connected each other by a bracing system in a form of pyramid truss system. Based on the results of elasto-plastic buckling analysis, considering several severe loading cases of uniformly distributed loads and non-uniformly distributed loads, this newly proposed dome is proved to have a high performance in elasto-plastic buckling comparable to an ordinary two-way single layer lattice dome stiffened by diagonal braces.

キーワード: 弾塑性座屈解析; ドーム; アーチ

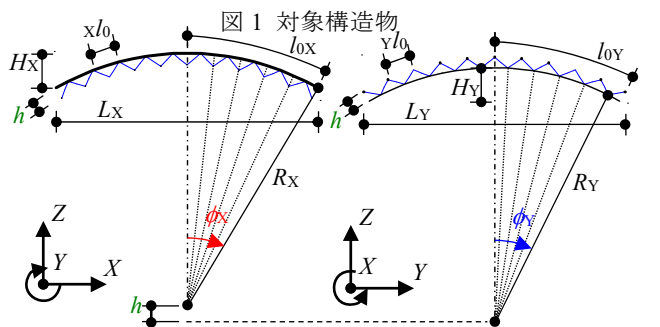
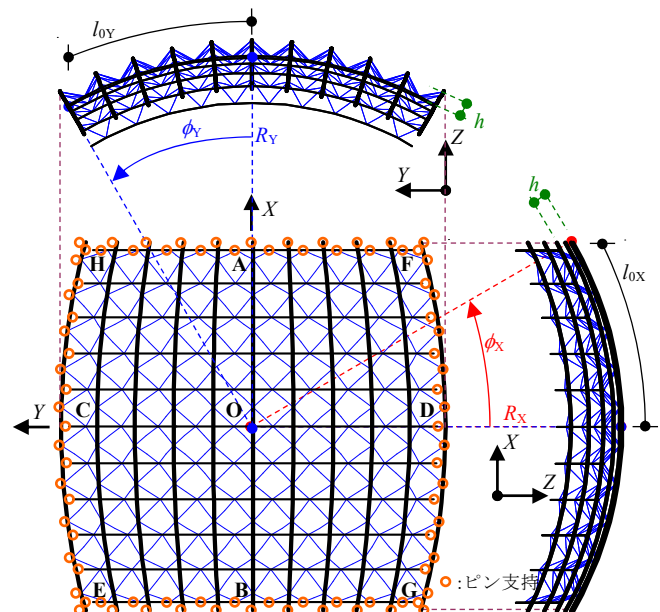
Keywords: Elasto-plastic buckling analysis; Dome; Arch.

1. はじめに

骨組膜構造では、鋼などの線材で構成された単層直交格子ドームが用いられている。この単層直交格子ドームは、ブレース部材で補剛されないものと補剛されるものに大きく分類される。一般に、ブレース部材で補剛されない構造は、面内せん断剛性が低く¹⁾、アーチに似た座屈特性となり、ブレース部材で補剛される構造は、高い面内せん断剛性のため、補剛されない場合に比べ座屈荷重が高くなる。ブレース部材は、座屈荷重を上昇させるのに効果的であり、軽量の単層直交格子ドームの建設には必要とされる構造要素である。

アーチ群が同一曲面にある従来の直交格子ドームでは、直交するアーチの交点に溶接等の接合部が現れる。また、ブレース補剛の単層直交格子ドームでは、アーチの交点にブレース部材を接合するための接合部が追加で必要とされるため、複雑な接合部となる場合が多い。

そこで、既往の研究²⁾では、骨組膜構造への応用も想定し、従来のブレース部材により補剛された単層直交格子ドームの特性を持ちながら、異なる空間構成となる新しい2曲面構成直交格子ドームを提案した。この新しい空間構造の座屈性能について検討を行い、その有用性を明らかにした。継続研究^{3, 4)}では、荷重条件、ブレース部材の部材特性、2曲面の距離による影響について検討を行い、圧縮強度曲線を利用した弾塑性座屈荷重の算定法の有効性・実用性を確認した。しかし、これらの研究



(a) X-Z 平面 (AOB 断面図) (b) Y-Z 平面 (COD 断面図)

図2 対象構造物 (簡略図)

では、ブレース部材が早期に個材座屈・降伏することにより最大座屈荷重となるため、全体座屈性状の検討は十分とは言えない状況である。

本研究では、当該ドームの全体座屈の分析を通し、空間構成上の有用性と実現性を明らかにする。特に、荷重条件、2曲面の距離をパラメータとして座屈性能を検討し、設計に必要な基礎資料を提供する。また、鋼材重量に対する耐力時の全荷重の比から高材料効率性を確認し、実用性を検証する。

2. 2曲面構成直交格子ドーム

2.1. ドームの空間構成

本研究では、図1に示す2曲面構成直交格子ドームを対象とする。図2,3に示す通りX方向のアーチ部材とY方向のアーチ部材は、相互に高さが異なるため交わることがない。間隔を置いて直交するアーチ部材は、ピン接合の補剛材で接続されている。なお、比較検討のため従来の単層直交格子ドームについても検討を行うがX方向アーチとY方向アーチの交点は剛接合されている。

2.2. 形状

図1,2に示す通りX方向(上面)およびY方向(下面)に配置された複数の円弧アーチは、それぞれの両端でピン支持され、弧長は60[m]である。部材長さは、X, Y方向とも、 $l_0 = x l_0 = y l_0 = 6$ [m]の直線部材とし、10部材を連結したものである。なお、部材の個材座屈をできるだけ精度よく把握するため、1部材を要素長 $x l = y l = 3$ [m]の2要素で表している。

ドームの半開角 ϕ_x と ϕ_y は文献3)に用いられているモデルとし30[deg.]と設定した。半開角 ϕ_x と ϕ_y 、曲率半径 R_x と R_y 、平面上のスパン L_x と L_y 、ライズ H_x と H_y 、アーチの半弧長 l_{0x} と l_{0y} を図2と表1,2に示す。なお、上面(X方向)と下面(Y方向)に配置したアーチの高さの間隔 h は、0[m]から0.5[m]毎に2.5[m]まで変化させて、この間隔の座屈に対する影響を分析する。 $h=0$ は従来の単層直交格子ドームとなっている。

X方向とY方向に配置したアーチ部材(以降、X方向部材、Y方向部材)および補剛材(以降、ブレース部材)は、400N級の鋼材とし、弾性係数 $E=205$ [kN/mm²]、降伏応力度 $\sigma_y=235$ [N/mm²]とする。部材は、全長にわたり一様な鋼管とし、表3,4に示す通り部材細長比(部材長さ6[m])アーチ部材 $\lambda_0=60$ 、ブレース部材 $BR\lambda_0=110$ とした。なお、X方向アーチは球形に配置され、Y方向アーチは推動型であるためブレース部材は位置によって部材長が異なっており、本座屈長さ BRl_0 を仮定し、塑性化による影響を起こさないため弾性体とした。

アーチ部材については、部材細長比 λ_0 、断面二次半径 r_g 、管径(管厚中心距離) d_0 、断面積 A 、断面二次モーメント I_0 ($=I_y=I_z$)、降伏軸力 N_y および全塑性モーメント M_p ($=M_{py}=M_{pz}$)は、次式を用いた。また、ブレース部材に

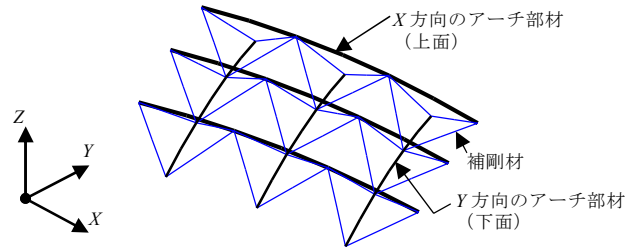


図3 X,Y方向アーチ部材を斗形形状に構成した補剛材による接合

表1 全体形状諸元 (X方向)

ϕ_x	R_x [m]	L_x [m]	${}^{AOB}H_x$ [m]	l_{0x} [m]
30	57.3	57.3	7.68	30.0

表2 全体形状諸元 (Y方向)

ϕ_y	R_y [m]	L_y [m]	${}^{COD}H_y$ [m]	l_{0y} [m]
30	57.3	57.3	7.68	30.0

表3 X, Y方向部材の部材特性

λ_0	d_0 [mm]	t [mm]	N_y [kN]	M_p [kN·m]	l_0 [m]
60	283	10	2088	188.0	6.00

表4 ブレース部材の部材特性

$BR\lambda_0$	h [m]	BRd_0 [mm]	BRt [mm]	BRl_0 [m]
110	0	105	5.0	4.100 (3.993~4.241)
	0.50	108		4.200 (4.024~4.270)
	1.00	111		4.300 (4.116~4.358)
	1.50	113		4.400 (4.264~4.498)
	2.00	118		4.600 (4.466~4.688)
	2.50	126		4.900 (4.710~4.900)

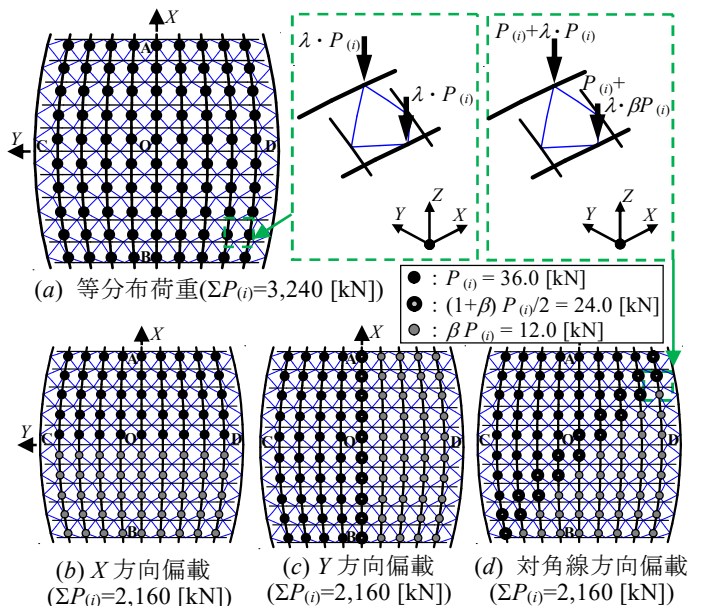


図4 荷重条件

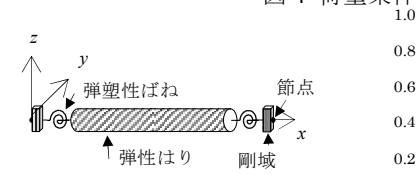


図5 両端ばねモデル

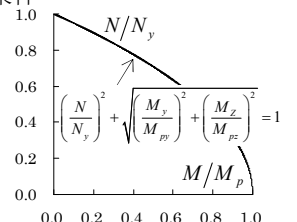


図6 降伏曲面

関しても同様に次式にて算出した。

$$\lambda_0 = l_0/r_g, d_0 = 2\sqrt{2} \cdot r_g, A = \pi \cdot d_0 \cdot t, I_0 = A \cdot r_g^2$$

$$I_0 = A \cdot r_g^2, N_y = A \cdot \sigma_y, M_p = d_0^2 \cdot t \cdot \sigma_y \quad (1)$$

2.3. 荷重条件

膜材が X 方向部材に張られると想定し、荷重条件としては近似的であるが、図 4 のように X 方向部材（上面）とブレース部材との交点に基本荷重を作用させた。荷重点総数は $n=90$ 個である。なお、 $h=0$ の単層直交格下ドームでは X 方向アーチと Y 方向アーチの交点に荷重は行っていない。

等分布荷重の荷重における 1 節点あたりの基本荷重は図 4(a) に示すように $P_{(i)}=36$ [kN]（負担面積 36 [m²]、単位面積当たりの固定重量を 1.0 [kN/m²]⁹⁾）である。等分布荷重の荷重では、この基本荷重を荷重係数 λ 倍していくことで荷重を増加させる。なお、荷重係数 $\lambda=1.0$ としたときの荷重は固定荷重 $P_{(i)}$ となる。

偏載荷重は、雪荷重を想定したものであり、偏載度

$\beta=1/3$ を用いた X 方向偏載荷重、 Y 方向偏載荷重、対角線方向偏載荷重を想定する。荷重手順としては、固定荷重 $P_{(i)}$ を載加後、図 4(b) から図 4(d) の偏載荷重を λ 倍していくことで荷重を増加させる。なお、基本荷重の総和 $\Sigma P_{(i)}$ も同図に示す。

3. 弾塑性座屈解析法

数値解析は幾何学的非線形性と材料学的非線形性を考慮した文献⁶⁾と同様であり、荷重の初期段階を荷重増分法、それ以降は変位増分法を用いた。弾塑性座屈荷重は、荷重-変位曲線の最初の最大値を採用した。解析に用いる 1 要素を図 5 に示す。部材の両端に部材降伏を表現するばねを設定する。部材降伏後は、ばねの応力は、図 6 で示す降伏曲面上を流動すると仮定する。また、はり要素は弾性体と仮定し部材両端の剛域長さは 0 とする。

4. 弾塑性座屈性状

対象構造物の変形、荷重-変位関係、軸力分布、曲げモーメント分布、軸力・曲げモーメント相関関係を分析する。

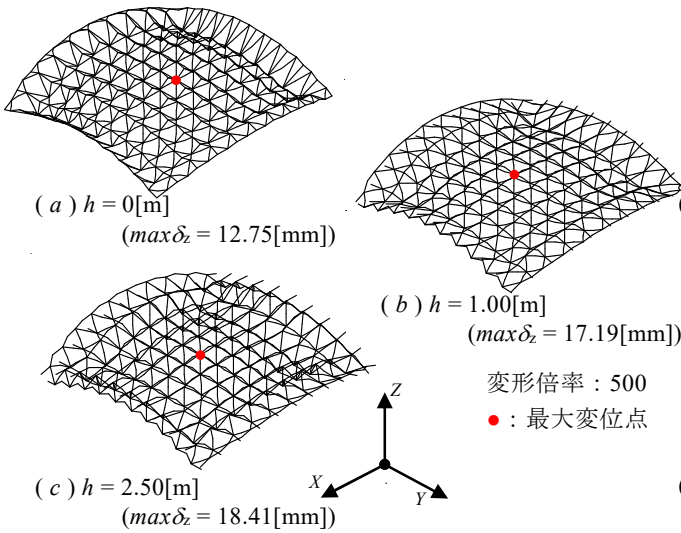


図 7 変形図（等分布荷重, $\lambda=2.579$ ）

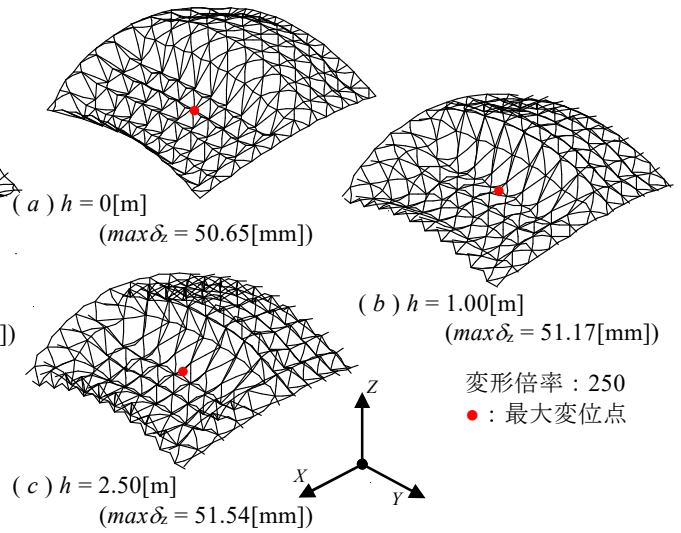


図 8 変形図（ X 方向偏載荷重, $\lambda=2.579$ ）

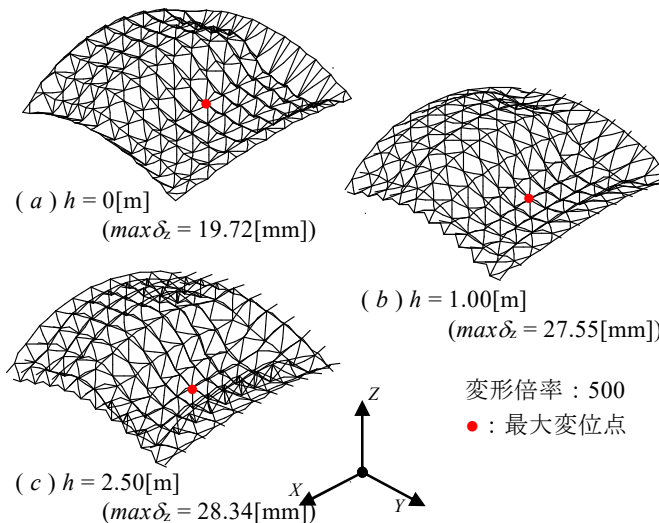


図 9 変形図（ Y 方向偏載荷重, $\lambda=2.579$ ）

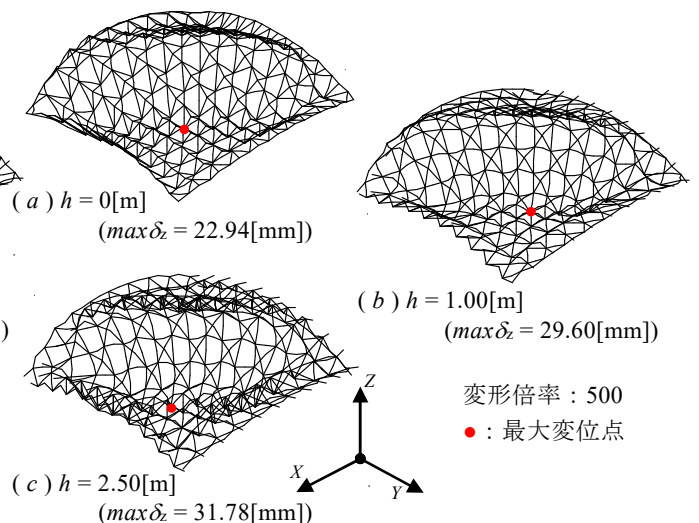


図 10 変形図（対角線方向偏載荷重, $\lambda=2.579$ ）

4.1. 変形状と耐力

変形および最大変位（荷重係数 $\lambda=2.579$ ）を図7から図10に示す。なお、荷重係数 $\lambda=2.579$ はX方向偏載荷重において $h=0$ [m]が初期降伏を起こす荷重係数であり、これより小さな荷重に対しては、荷重と変形の関係は、若干の非線形が見られるものの弾性状態である。

荷重係数-変位関係を図11~14, 最大荷重係数一覧を表5に示す。なお、荷重係数-変位関係は固定荷重 $P_{(0)}$ （荷重係数 $\lambda=1.0$ ）の時点で勾配が変化しているが、固定荷重 $P_{(0)}$ 載加後、偏載度 β を用いて載荷しているためである。

(1) 等分布荷重に対する変形：図7から理解できるように、周辺以外の節点が全体的に沈み込むように変形し、ドーム頂部が最大変位点となっており、2曲面の距離 h の増加とともに固定荷重に対する最大鉛直変位 $max\delta_z$ が増大している。また、図11よりドーム頂部変位から判断される鉛直剛性は、2曲面の距離 h の増加によ

り緩やかな傾斜となっており鉛直剛性は低下している。これは、2曲面の距離 h の増加によりブレース部材の傾きが大きくなり、面内剛性が低下したためだと考えられる。

(2) 偏載荷重に対する変形：図8~10から理解できるように、偏載度 $\beta=1/3$ よりも $\beta=1.0$ の大きな荷重が作用する部分で大きな鉛直変位が生じており、2曲面の距離 h の増加とともに最大鉛直変位 $max\delta_z$ が増大している。また、図12~14より、いずれの偏載荷重に関しても、鉛直剛性は等分布荷重の場合と同様に2曲面の距離 h の増加に伴い低下している。

(3) 耐力：表5から理解できるように最大荷重における荷重係数（以降、最大荷重係数）は、2曲面の距離 $h=0$ [m]が最も小さく、 $h \leq 1.0$ の範囲では、 h の増大とともに最大荷重係数は増加している。それ以降は、若干の増減はあるがほぼ同程度の最大荷重係数となっている。これは、 $h=0$ [m]の単層直交格子ドームから2曲面構成直

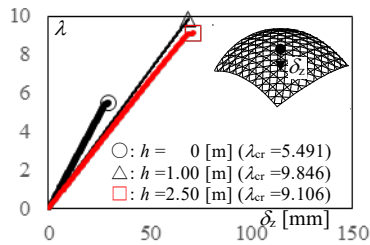


図11 荷重係数-変位関係 (等分布荷重)

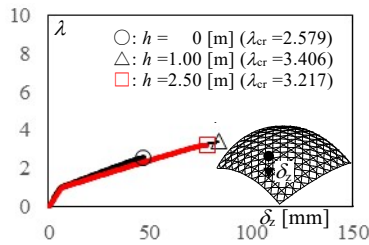


図12 荷重係数-変位関係 (X方向偏載荷重)

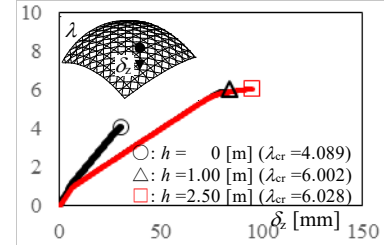


図13 荷重係数-変位関係 (Y方向偏載荷重)

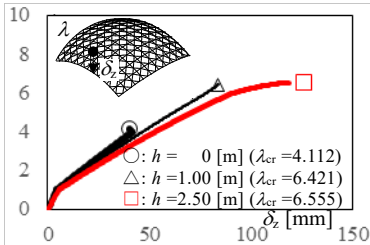


図14 荷重係数-変位関係 (対角線方向偏載荷重)

表5 最大荷重係数 λ_{cr} 一覧

荷重条件 \ h [m]	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
等分布荷重	5.491	7.893	9.846	9.398	9.172	9.106
X方向偏載	2.579	3.212	3.406	3.272	3.226	3.217
Y方向偏載	4.089	5.365	6.002	6.005	5.987	6.028
対角線偏載	4.112	5.707	6.421	6.551	6.563	6.555

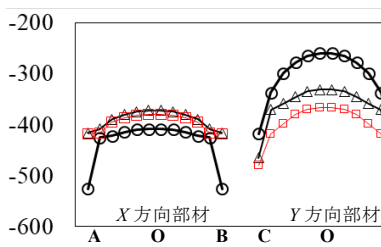


図15 軸力分布 (等分布荷重, 凡例 図16 参照)

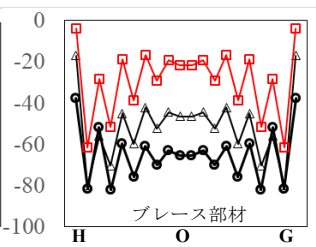


図16 曲げモーメント分布 (等分布荷重)

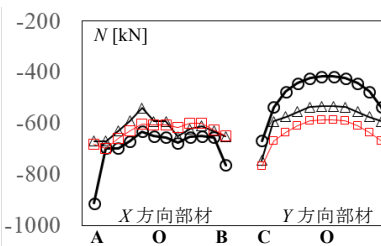


図17 軸力分布 (X方向偏載荷重, 凡例 図18 参照)

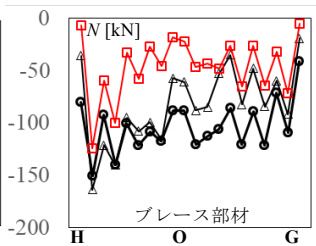


図18 曲げモーメント分布 (X方向偏載荷重)

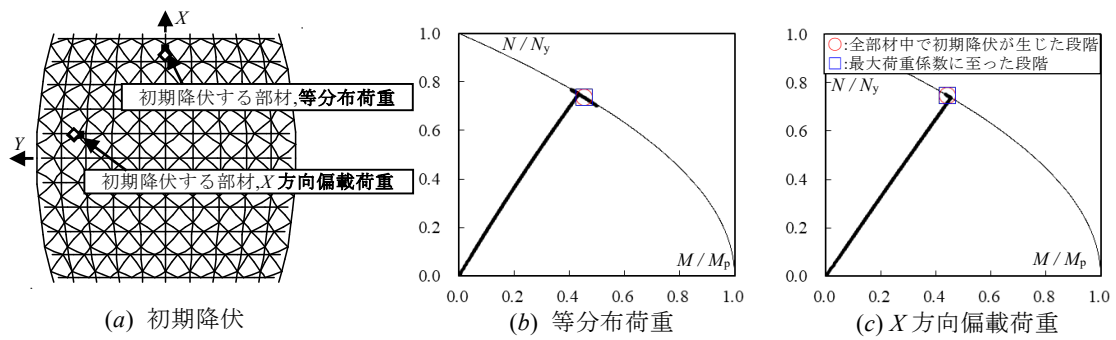


図 19 $N-M$ ($h = 2.50[m]$)

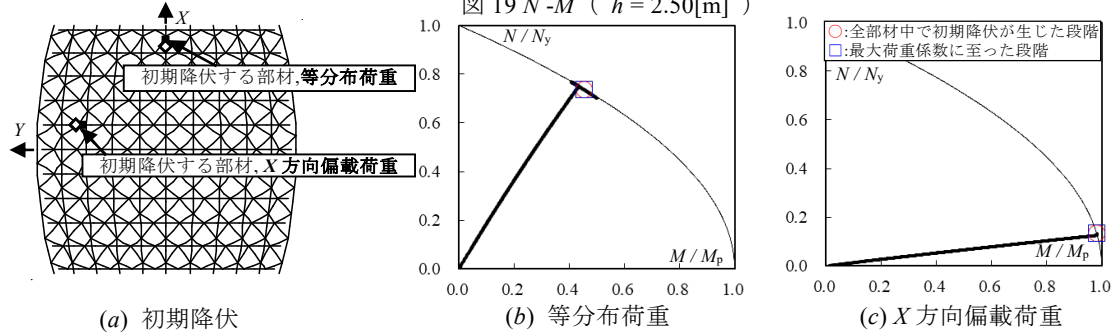


図 20 $N-M$ ($h = 1.00[m]$)

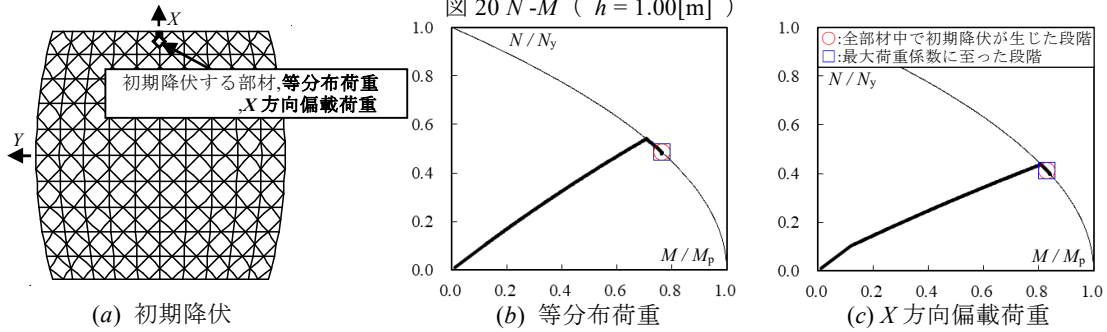


図 21 $N-M$ ($h = 0[m]$)

交格子ドームとなることで曲げ剛性が増加し複層ドームに挙動が近づいたためだと考えられる。 X 方向部材の軸力分布(図 15,17)の通り $h=0[m]$ から $1.00[m]$ となることで最大軸力が下がり、初期降伏が生じにくくなったことで耐力が上昇したと考えられる。また、 $h=1.00[m]$ は図 20 の通りアーチ端部が降伏し耐力に至っており、 $h=2.50[m]$ においても図 19 の通り同様な位置が降伏している。これは、両ドームともアーチ端部の降伏で耐力が決まってしまったため同程度の耐力になったと考えられる。

X 方向偏載荷重の最大荷重係数が最も小さい結果となっている。これは、載荷面である X 方向部材(上面)に偏載荷重がかかるため曲面としてではなくアーチとして抵抗したためだと考えられる。

4.2. 軸力分布性状、曲げモーメント分布性状、 $N-M$ 関係

荷重係数 $\lambda=2.579$ における部材応力分布を図 15~18 に示す。なお、図 1 に示すように図の横軸 AOB は X 方向中央構面、COD は Y 方向中央構面、HOG は斜め方向断面である。また、荷重の増加にあたり初期降伏する部材に関する軸力-曲げモーメント相関関係を図 19~21 に示す。

(1) 等分布荷重に対する性状：対象構造物は、図 15, 16 に示すように X, Y 方向部材ともに円弧アーチの端部が最大圧縮軸力 $500[kN]$ 前後、最大曲げモーメント $20[kN \cdot m]$ 前後となっており、図 19~21 (a),(b)に示すようにアーチ部材の初期降伏は境界周辺に位置している。これは、鉛直荷重に対して曲面として抵抗しているため、境界周辺で軸力が最大となり、降伏したと考えられる。また、図 15 に示すように補剛ブレースの軸力は 2 曲面の距離 h の低下とともに軸力が増加している。これは、 h の低下により面内剛性が増加し、軸力が増加したためだと考えられる。

(2) X 方向偏載荷重に対する性状：図 17, 18 に示すように、応力分布形状は 2 曲面の距離 h による影響は少なく類似であるが、 X 方向部材にのみ偏分布の応力状態となっている。これは上面に位置する X 方向部材にのみ荷重が載荷されているため偏分布となり、下面に位置する Y 方向部材は等分布荷重として抵抗したためだと考えられる。また、曲げモーメントは、単層直交格子ドームに比べ二曲面構成直交格子ドームの値が小さくなっている。これは、2 曲面の距離 h が増加することで曲げ剛性が増加したためだと考えられる。

5. 鋼材重量に対する耐力時の全体荷重の比

鋼材重量を表6に、材料効率を表7に示す。なお、材料効率は（耐力時の全体荷重 $\lambda_{cr} \times \Sigma P_{(i)}$ / 鋼材重量）であり、値が大きいほど材料効率が高いことを示す。

等分布荷重およびY方向、対角線方向偏載荷重に関しては、従来からの単層直交格子ドーム ($h = 0$ [m]) に比べ、2曲面構成直交格子ドーム ($h \geq 0.5$ [m]) の耐力に関する材料効率は31~78%程度高くなっている。なお、X方向偏載荷重に関しては、単層直交格子ドーム ($h = 0$ [m]) に比べ、2曲面直交構成格子ドーム ($h \geq 0.5$ [m]) の耐力に関する材料効率は20~31%程度となっている。

6. まとめ

2曲面構成直交格子ドームに対して固定荷重あるいは雪荷重などの鉛直荷重を想定した弾塑性座屈解析を行い、その座屈性状を分析した。従来の剛接合単層直交格子ドームとは接合方法が異なるので、剛接合単層直交格子ドームとの比較を行い、変形、耐力、耐力時の全体荷重/鋼材重量などの特性を明らかにした。

ここで得られた知見を以下に示す。

- 1) 2曲面構成の直交格子ドームは、等分布荷重、偏載荷重とも剛接合単層直交格子ドームに比べ、耐力はやや高くなる。なお、等分布荷重に対しては、最も耐荷性能が高いが、載荷面であるX方向部材に偏載荷重がかかる場合は、あまり耐荷性能は高くない。
- 2) 2曲面の距離 h の増大により面内剛性が低下するため、鉛直荷重に対する初期剛性は低下している。
- 3) 2曲面の距離 h の増大することで上面であるX方向部材と下面であるY方向部材の距離は増加するため、厚い曲面のようなものとなり、曲げ剛性の増大により耐力は増加している。しかし、 $h \geq 1.0$ の範囲では若干の増減はあるがほぼ同程度の耐力となっている。
- 4) (耐力時の全体荷重 / 鋼材重量) の比について、2曲面構成直交格子ドームと剛接合単層直交格子ドームを比べた場合、2曲面構成直交格子ドームの(耐力時の全体荷重 / 鋼材重量) の比は高く、材料効率が高いことが分かった。

【参考文献】

- 1) 加藤史郎, 山下哲郎, 柴田良一: 連続体近似法による2方向格子シェルの座屈耐力評価, 構造工学論文集, Vol.46B, pp167 - 174, 2000.3
- 2) 加藤史郎, 樋口直也, エカ サトリア, 中澤祥二: 2曲面構成のブレース補剛直交格子ドームの弾塑性座屈耐力 - 新構造形式の単層格子ドームの可能性の検討 -, 構造工学論文集, Vol.55B, pp.499-506, 2010.3
- 3) 加藤史郎, 樋口直也, 中澤祥二: 2曲面構成直交格子ドームの座屈性状と座屈荷重, 膜構造研究論文集 2009, No23, pp.29 - 39, 2010.3
- 4) 樋口直也, 加藤史郎, 中澤祥二: 2曲面構成直交格子ドームの座屈性状と座屈荷重 - アーチ形状に対する一考察 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.659-660
- 5) 日本建築学会: ラチスシェル屋根構造設計指針, 8.1節, 2016.11

表6(a) 鋼材重量 $h = 0$ [m]

部材名	全部材長	断面積 [m ²]	重量 [kN]
X方向部材	660	0.009	458
Y方向部材	624	0.009	433
ブレース部材	1,659	0.002	256
Σ	-	-	1,147

表6(b) 鋼材重量 $h = 0.5$ [m]

部材名	全部材長	断面積 [m ²]	重量 [kN]
X方向部材	660	0.009	458
Y方向部材	625	0.009	434
ブレース部材	1,671	0.002	258
Σ	-	-	1,150

表6(c) 鋼材重量 $h = 1.0$ [m]

部材名	全部材長	断面積 [m ²]	重量 [kN]
X方向部材	660	0.009	458
Y方向部材	625	0.009	434
ブレース部材	1,707	0.002	263
Σ	-	-	1,155

表6(d) 鋼材重量 $h = 1.5$ [m]

部材名	全部材長	断面積 [m ²]	重量 [kN]
X方向部材	660	0.009	458
Y方向部材	625	0.009	434
ブレース部材	1,764	0.002	272
Σ	-	-	1,164

表6(e) 鋼材重量 $h = 2.0$ [m]

部材名	全部材長	断面積 [m ²]	重量 [kN]
X方向部材	660	0.009	458
Y方向部材	626	0.009	435
ブレース部材	1,842	0.002	284
Σ	-	-	1,177

表6(f) 鋼材重量 $h = 2.5$ [m]

部材名	全部材長	断面積 [m ²]	重量 [kN]
X方向部材	660	0.009	458
Y方向部材	626	0.009	435
ブレース部材	1,937	0.002	299
Σ	-	-	1,192

表7 耐力時の全体荷重 $\lambda_{cr} \times \Sigma P_{(i)}$ / 鋼材重量

荷重条件	h [m]					
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
等分布荷重	15.5	22.2	27.6	26.2	25.2	24.8
X方向偏載	4.9	6.0	6.4	6.1	5.9	5.8
Y方向偏載	7.7	10.1	11.2	11.1	11.0	10.9
対角線偏載	7.7	10.7	12.0	12.2	12.0	11.9

- 6) 加藤史郎, 金鍾敏, 仁保裕: 偏載荷重を受ける単層ラチスドームの座屈応力度と座屈荷重に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第541号, pp.121-128, 2001.3