

異なるガウス曲率をもつDD型二層立体ラチス構造の構造特性に関する研究

Effect of Gaussian Curvature on Structural Properties for Double Layer Lattice Structure of Diagonal Meshes in Top and Bottom Layers

建築構造学分野 青池 弘樹

Abstract

様々な網目形状を有する二層立体ラチス構造については、これまで多くの構造実験や数値解析によってその弾性座屈挙動及び座屈後挙動について、解明されつつある。そのような中、上下面のどちらかに菱形網目形状をもつ二層立体ラチス構造に関する研究は数多くあるものの、上下面共に菱形網目を有する二層立体ラチス構造の研究は少ない。そこで本論では、全体形状として異なるガウス曲率をもつ上下面共に菱形網目を有するDD型二層立体ラチス構造を対象とし、静的鉛直荷重を受ける場合において、ガウス曲率による耐荷特性への影響について汎用有限要素法解析プログラムABAQUSを用い線形座屈解析を行い比較、検討し、今後の建築構造学、特に立体ラチス構造物の設計に寄与する有益な資料を作成する事を目的としている。

1. 序

二層立体ラチス構造の構造形式は、平板を始めとして、シリンダー、ドーム、あるいは曲率の変化するような自由な曲面などの様々な形式を持つことが可能である。これらの構造物は同じ構造ユニットの繰り返して構成されており、各構造ユニットの部材によって幾何学的な模様を形づくる。

その構造技術的な特色としては、部材数と節点数が非常に多いことから、部材の寸法誤差、組立精度の不揃いによる、形状不整と初期応力が生じやすいということはいえるが、近年では部品と施工方法が標準化され、その形状と体力の信頼度は高まってきている。また、一般にラチス構造の部材の応力は軸力が卓越しており、荷重に対して効率良く抵抗するシステムといえる。また重量に対する剛性が高いので大スパン架構が可能となる。一方、二層立体ラチス構造は、RC板のような充実な連続体には無い、それぞれの構成する網目形状によって異なる力学的な特性を有している。

構造技術的な面、材料効率の面でも優れた顔を持つ二層立体ラチス構造は、建築家の興味をひきつけている一方で、技術的な面から、空間も均質な表現になることが多く、技術面からの制約が表現に決定的な影響を及ぼしていた。しかし、コンピュータの電算処理能力の革命的な進歩に伴い、FEM(finite element method)¹⁾²⁾を用いた複雑なモデルの解析が容易となり、スペースフレームの力学的性状の解明は急速に進み、技術面での制約から解放され、より機能的で表現豊かな大空間建築が近年多く建設されてきている。

そこで、本論では、網目形状について今までそれほ

ど研究されていなかったSS型網目形状を45度斜交させDD型(diagonal+diagonal)としたモデルに着目し、その全体形状において曲率の変化によるガウス曲率の変化の弾性座屈挙動に及ぼす効果を検討していく。

2. 数値解析モデル

2.1 解析モデル

本論で取り扱う解析モデルは、Fig. 1に示すように、上下面ともに方向の部材配置から成るSS型網目を45度斜交させたDD型(Diagonal+Diagonal)の二層立体ラチス構造である。全体形状としては、ガウス曲率が正となっているアーチ方向半開角45度、桁行き方向半開角45度となっているモデル、アーチ方向半開角45度、桁行き方向半開角20度となっているモデル、ガウス曲率が負となっているアーチ方向半開角-45度、桁行き方向半開角20度のモデル、ガウス曲率が0となっているアーチ方向半開角45度、桁行き方向半開角0度、また、アーチ方向半開角0度、桁行き方向半開角0度となっているモデルの計5種類とする。また境界条件³⁾はモデル下面の最外縁節点での4辺ピン支持及び4辺ローラー支持の2種類とする。以上に示した幾何形状、境界条件より解析モデル名称をFig. 2のように定義する。

モデルに使用する部材は、短期許容応力度設計⁴⁾を行い、部材断面を決定するが、その際、断面は既製の薄肉円形鋼管の断面特性⁵⁾から導いた回帰式(1)から算出するものとする。

$$I = 3.507 \times 10^{-4} A^3 + 1.040 \times A^2 - 106.1A \quad (1)$$

短期設計荷重⁶⁾⁷⁾については、固定荷重 {構造材重量+仕上げ材重量(0.3kN/m²)} + 積載荷重(0.3kN/m²) + 積雪

荷重(1.603kN/m²)とし、負担面積に応じて節点のみに
 載荷する事を想定する。Table. 1 に設計した断面諸元
 及び細長比を示す。Fig. 3 に例としてB-Pモデルの幾
 何形状を示し、Fig. 4 にB-P のモデルの境界条件、
 Fig. 5 に荷重条件を示す。

3. 弾性座屈

3.1 解析手法

二層立体ラチス構造の弾性座屈性状を明らかにする
 ため、汎用有限要素法解析プログラムABAQUS を用い
 線形弾性座屈解析を行う。ABAQUS では、線形剛性行
 列と幾何剛性行列を用いる方法で、線形弾性座屈解析
 が行われている。

Mesh Pattern of Upper Layer Mesh Pattern of Lower Layer

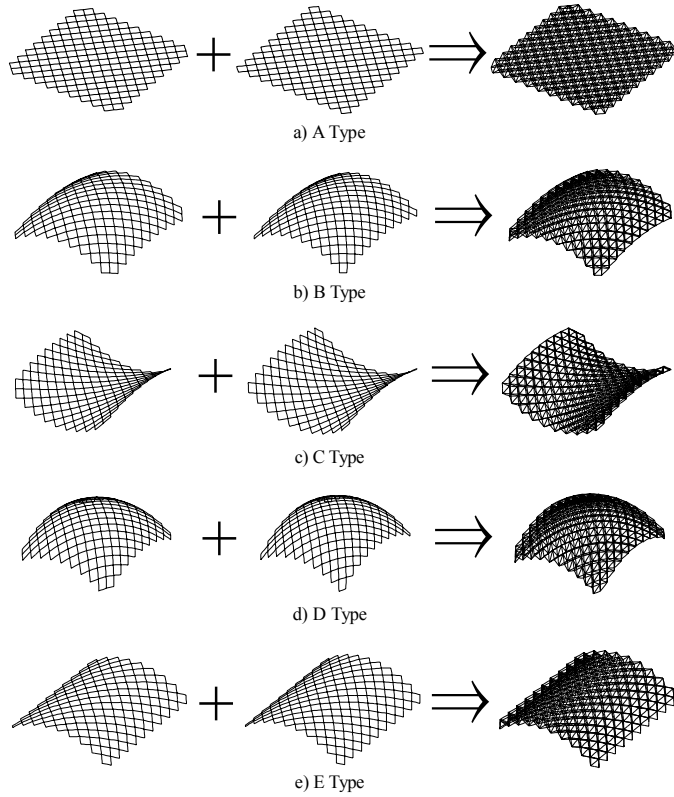


Fig.1 網目形状

- 境界条件 P.Pin
 R.Roller
- 全体形状
- A. アーチ方向半開角 0 度桁行き方向半開角 0 度
 - B. アーチ方向半開角 45 度桁行き方向半開角 20 度
 - C. アーチ方向半開角 -45 度桁行き方向半開角 20 度
 - D. アーチ方向半開角 45 度桁行き方向半開角 45 度
 - D. アーチ方向半開角 45 度桁行き方向半開角 0 度

Fig.2 モデル名称

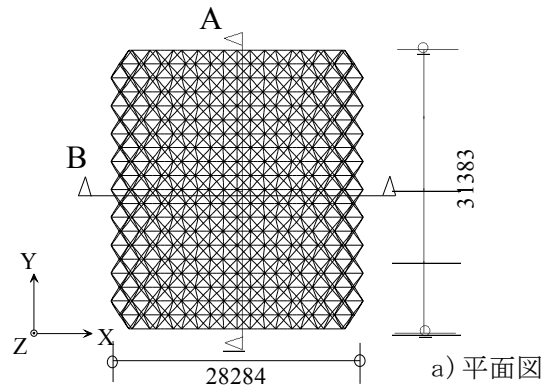
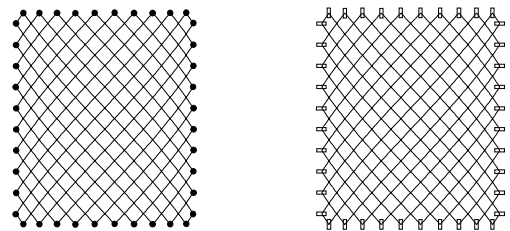


Fig.3 幾何形状 (B Type) (mm)

Table.1 断面諸元及び細長比

モデル	外径、厚さ x t(mm)	断面積 A(mm ²)	断面2次モーメント (mm ⁴)	細長比	
A-P	上弦材	60.5×3.2	576.0	48.4×10 ⁴	98.6
	下弦材	48.6×2.5	362.1	11.3×10 ⁴	122.5
	ウェブ材	48.6×2.3	334.5	8.91×10 ⁴	118.7
B-P	上弦材	34.0×2.3	229.1	3.02×10 ⁴	143.4
	下弦材	42.7×2.3	291.9	5.97×10 ⁴	136.8
	ウェブ材	34.0×2.3	229.1	3.02×10 ⁴	179.8
C-P	上弦材	48.6×2.3	334.5	8.91×10 ⁴	152.8
	下弦材	42.7×2.3	291.9	5.97×10 ⁴	182.1
	ウェブ材	42.7×2.3	291.9	5.97×10 ⁴	186.9
D-P	上弦材	34.0×2.3	229.1	3.02×10 ⁴	231.5
	下弦材	34.0×2.3	229.1	3.02×10 ⁴	173.6
	ウェブ材	27.2×2.3	158.3	1.16×10 ⁴	228.6
E-P	上弦材	64.7×2.29	448.8	21.8×10 ⁴	90.6
	下弦材	81.7×2.24	559.9	44.1×10 ⁴	65.7
	ウェブ材	51.0×2.31	353.2	10.5×10 ⁴	112.9
A-R	上弦材	60.5×3.2	576.0	48.4×10 ⁴	98.6
	下弦材	48.6×3.2	456.4	11.8×10 ⁴	124.3
	ウェブ材	48.6×3.2	456.4	11.8×10 ⁴	120.9
B-R	上弦材	42.7×2.5	315.7	6.40×10 ⁴	142.7
	下弦材	42.7×2.5	315.7	6.40×10 ⁴	137.4
	ウェブ材	34.0×2.3	229.1	3.02×10 ⁴	179.8
C-R	上弦材	60.5×4.0	710.0	28.5×10 ⁴	125.0
	下弦材	60.5×3.2	576.0	48.4×10 ⁴	98.6
	ウェブ材	60.5×2.3	420.5	17.8×10 ⁴	102.0
D-R	上弦材	34.0×2.3	229.1	3.02×10 ⁴	182.1
	下弦材	42.7×2.3	291.9	5.97×10 ⁴	136.8
	ウェブ材	34.0×2.3	229.1	3.02×10 ⁴	179.8
E-R	上弦材	70.3×2.59	551.6	31.7×10 ⁴	83.5
	下弦材	88.4×2.90	777.4	71.1×10 ⁴	61.1
	ウェブ材	48.2×2.23	322.0	8.53×10 ⁴	119.5



● ピン支持 □ X 方向ローラー ▭ Y 方向ローラー

Fig.4 境界条件 (B Type)

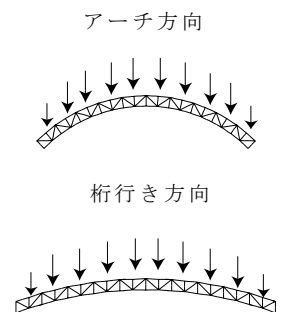
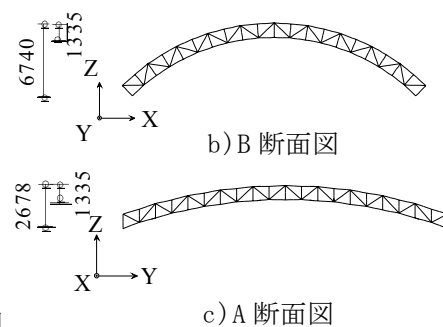


Fig.5 荷重条件

3.2 弾性座屈性状

全解析モデルに対して、線形弾性座屈解析を行った。Table. 2に各解析モデルの弾性座屈荷重、弾性座屈荷重の全鋼材重量に対する比率及び弾性座屈荷重の設計荷重に対する比率をそれぞれ示す。

3.3.1 荷重変形関係

弾性座屈解析により得られた各解析モデルの剛性について比較している。Fig. 6に各解析モデルの全体の鉛直荷重と上面における中央節点の鉛直変位との関係を示す。その結果より、支持条件が4辺ピン支持の場合、すべてのモデルについて4辺ローラー支持の場合の方が剛性が大きく出ている。また、支持条件に関わらず、DType > BType > EType > CType > AType という順で剛性が高くなっている。

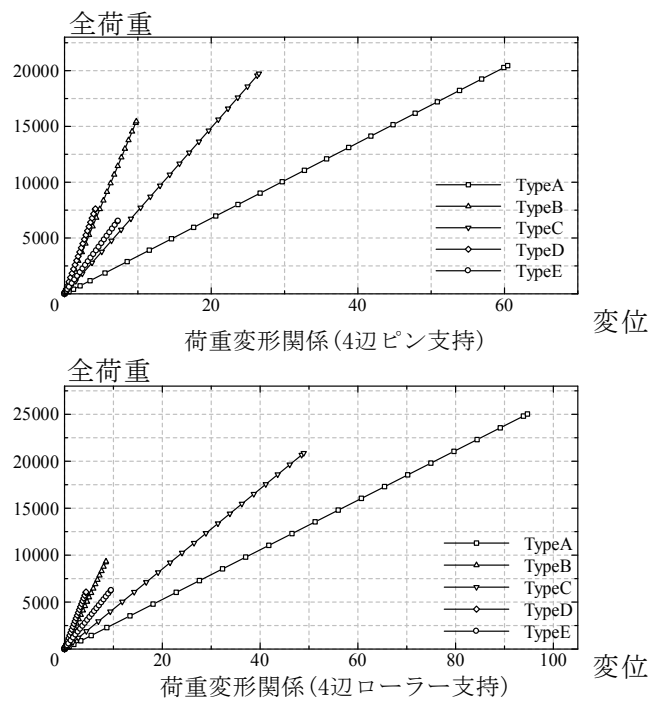


Fig.6 荷重変形関係

Table.2 弾性座屈解析結果

モデル	鋼材重量 P_w (kN)	設計荷重 P_D (kN)	弾性座屈荷重 P_E (kN)	P_E/P_w	P_E/P_D
A-P	394.5	2156.9	20453.6	51.8	9.5
A-R	478.0	2240.3	25027.9	52.4	11.2
B-P	246.0	2201.5	15453.1	62.8	7.0
B-R	273.4	2228.8	9322.0	34.1	4.2
C-P	353.0	2308.4	19736.6	55.9	8.5
C-R	628.1	2583.5	20862.2	33.2	8.1
D-P	205.4	1967.8	7615.9	37.1	3.9
D-R	246.0	2008.3	6070.4	24.7	3.0
E-P	391.4	1857.2	6519.4	16.7	3.5
E-R	449.1	1914.9	6230.7	13.9	3.3

3.3.2 座屈モード

座屈モードについては、ATypeでは、ピン支持のモデルがウェブ材の個材座屈を伴ったアーチ方向桁行き方向境界部中央での下弦材における面外方向の座屈モードが現れている。ローラー支持のモデルでは、モ

デル中央部において節点変位を伴う座屈モードが見られる。BTypeでは、ピン支持のモデルがウェブ材の個材座屈を伴った桁行き方向境界部中央での下弦材における面外方向の座屈モード、ローラー支持ではモデル四隅み位置するウェブ材の個材座屈モードとなっている。CTypeについては、ピン支持ではウェブ材のアーチ方向境界部中央での下弦材における面外方向の個材座屈を伴った座屈モード、ローラー支持ではモデル四隅に位置するウェブ材の個材座屈モードとなる。DTypeについては、ピン支持の場合、ウェブ材の個材座屈を伴った境界部での下弦材における面外方向の座屈モード、ローラー支持の場合はモデル四隅に位置する下弦材の個材座屈モードとなっている。最後にETypeについては、ピン支持、ローラー支持共にモデル中央部において節点変位を伴う座屈モードとなっている。 Fig. 7に全解析モデルについての座屈モードを

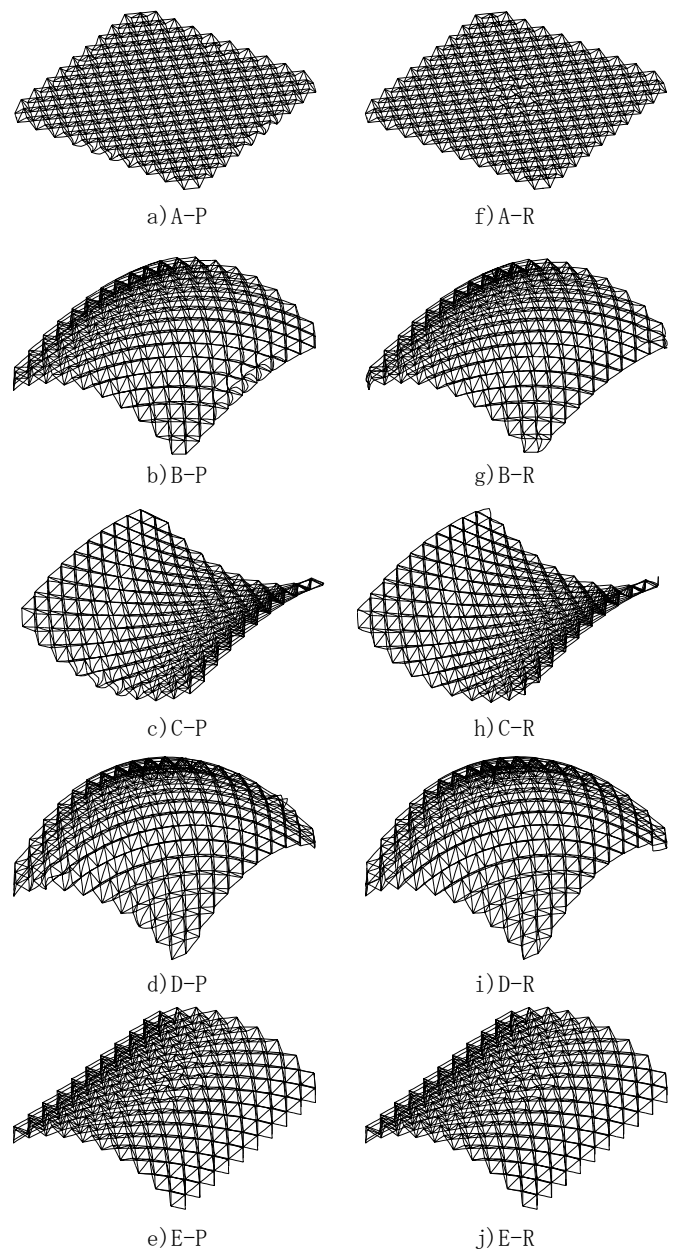


Fig.7 座屈モード

示す。

3.3.3 オイラー軸力比

A-P のモデルについては、桁行き方向境界部の下弦材で卓越した圧縮力が生じ、その部材が座屈している。また、A-R のモデルでは、下弦材において支配的な圧縮力が生じているがその付近の引張力による拘束効果によりその部材が座屈していない。B-P モデルについては上弦材において広範囲に卓越した圧縮力が分布しており、効率的に荷重を受け持っているといえる。しかし、座屈している箇所についてはウェブ材の面外方向への座屈である。また、B-R モデルについては、下弦材の四隅に圧縮力が生じている。C-P モデルは、下弦材で大きな引張力が生じ、またアーチ方向境界部において支配的な圧縮力が生じている。C-R モデルでは、C-P モデルでは下弦材においてアーチ方向境界部において生じていた圧縮力が見られなくなり上弦材の四隅において圧縮力が生じている。D-P, D-R モデルについては、よく似ているが下弦材においてのアーチ方向、桁行き方向について生じている圧縮力が4辺ローラー支持においては無くなり、四隅に生じるようになってきている。E-P、E-R モデルは共にオイラー軸力比図についてはほぼ同じで、上弦材中央から広範囲において圧縮力が生じている。

3.3.4 弾性座屈荷重

弾性座屈荷重は、AType、CType、については4辺ピン支持が4辺ローラー支持よりも座屈荷重が高い。逆にBType、DType、ETypeでは4辺ピン支持のモデルの方が4辺ローラー支持よりも座屈荷重が高くなっている。次に、弾性座屈荷重を鋼材重量で除した無次元化弾性座屈荷重について検討する。Fig. 8に無次元化弾性座屈荷重 P^E/P^W を示す。形状について着目すると、ATypeのみが4辺ピン支持のモデルより、4辺ローラー支持のモデルが無次元化弾性座屈荷重が大きくなっているが、その他のモデルについては4辺ピン支持のモデルが4辺ローラー支持のモデルより大きくなる傾向が見られる。ATypeについては、ピン支持とローラー支持では、オイラー軸力比においてピン支持では、下弦材の境界部の中央部に卓越した圧縮力が生じている

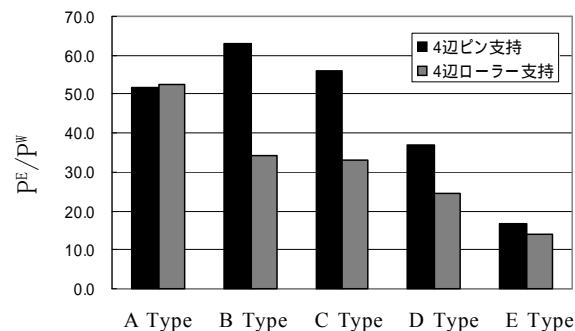


Fig.8 無次元化弾性座屈荷重

が、ローラー支持ではモデルの四隅に圧縮力が生じているもののその近辺には引張り力が生じていて拘束効果が生じていると考えられる。

次に、境界条件について着目すると、4辺ピン支持ではBTypeについて無次元化弾性座屈荷重は最大となり、続いてCType、AType、DType、ETypeとなっているが、4辺ローラー支持では、ATypeが最大となり、続いて、BType、CType、DType、ETypeとなっている。

4. まとめ

1) 境界条件によらず、剛性はピン支持よりローラー支持の方が大きな値をとる。また、その順序はDType > BType > EType > CType > ATypeの順となっており、アーチ方向、桁行き方向共に曲率を持たないATypeを除くとガウス曲率の影響での合成の高さは正 > 0 > 負となる。

2) BType、CType、DType、ETypeの4種類の全体形状については、4辺ローラー支持の時の方がローラー支持の時よりも無次元化弾性座屈荷重は大きくなり、ATypeに限り、近接する引張り部材の拘束効果によりその大きさはローラー支持の時の方がピン支持の時よりも大きくなる。

3) ガウス曲率が正となるBType、ETypeのモデルにおいてはピン支持において座屈モードは境界部中央付近に現れ、ローラー支持においてはモデルの四隅に現れる。また、ガウス曲率が0となるAType、ETypeについてはピン支持ではATypeにおいては座屈モードは境界部中央に現れるがETypeではモデル中央部における座屈モードとなった。ローラー支持の場合では、AType、EType共にモデル中央部における座屈モードとなった。ガウス曲率が負となるCTypeについては、ピン支持でアーチ方向境界部中央において、ローラー支持においてはモデル四隅での座屈モードとなる。

参考文献

- 1) 鷲津久一郎、他、編：「有限要素法ハンドブック I 基礎編」、培風館、pp94-137、1986. 1
- 2) 鷲津久一郎、他、編：「有限要素法ハンドブック II 応用編」、培風館、pp1025-1061、1986. 1
- 3) 日本建築学会：空間構造の数値解析ガイドライン 2001、2001. 5
- 4) 日本建築学会：鋼構造設計基準—許容応力度設計法—、2005. 9
- 5) 日本建築学会：鋼構造設計基準 SI 単位版、2002. 2
- 6) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、p. 230、2000. 4
- 7) 日本建築学会；空間構造の耐震設計と設計例、p. 48、2001. 1

討 議 等

◆討議 [谷池 義人 教授]

AType から EType までの鋼材量は同じか。

◆回答：本研究では、各解析モデルに対し設計荷重を決定し、その条件化で応力解析を行い、各解析モデルでの上弦材、下弦材、ウェブ材ごとに最大応力の許容応力に対する比率が0.8から0.9となるように断面を決定した為、各解析モデルにおいての鋼材量は異なっています。

◆討議 [大内 一 教授]

座屈荷重の決定方法はどのようになっていますか。

◆回答：使用した汎用有限要素法解析プログラム ABAQUS では線形弾性座屈解析においては、線形剛性行列と幾何剛性行列を用いる方法が採用されており、固有値問題となっています。そして、座屈荷重は最低次の固有値から得られます。

◆討議 [大内 一 教授]

なぜ剛性比較しているのですか。

◆回答：全体形状を決定する際に、曲率を与えることでアーチアクションによりガウス曲率が正のモデルについては半開角が大きいもの程、剛性が高くなるのではないかと考えられ、ガウス曲率が0となるモデルにおいても片方の方向に曲率をもつモデルについては剛性が高くなるのではないかと考えられた事から剛性について比較をしています。

◆討議 [松村 政秀 講師]

なぜ、DD 型網目形状を選択したのですか。

◆回答：菱形網目形状を持っている SD 型や DS 型では、網目形状により大きなせん断変形を持つことがあり、正方形網目形状を持つ SS 型ではせん断力による変形は小さい事が確認されています。そこで、SS 型網目形状を 45 度斜交させた DD 型網目形状でもせん断力による不安定な変形が考えられるのではないかと思い選択しました。

◆討議 [松村 政秀 講師]

モデルの大きさを決定する際は何を想定して決定したのか。

◆回答：二層立体ラチス構造は、体育館・スポーツ施設・アーケードやエントランス・展示場などの大空間構造の屋根として用いられることが多く、本研究においても大空間構造物の屋根を念頭に置きモデルの幾何形状を決定しました。

◆討議 [谷口 与史也 教授]

Table. 2 において B-P のモデルと E-P のモデルでの無次元化弾性座屈荷重の差の理由はどうしてですか。

◆回答：B-P と E-P のモデルでは、ガウス曲率が正と 0 となっています。その時、B-P のモデルでは桁行き方向境界部中央での座屈モードとなっていますが、E-P のモデルではモデル中央部での座屈モードとなっています。オイラー軸力比での比較をすると B-P のモデルでは下弦材での応力が E-P のモデルよりも全体的に大きく分布し、特に桁行き方向境界部中央で大きくなっています。B-P のモデルが桁行き方向に曲率を持つ事により、下弦材にも効率よく荷重を負担できる形状になったことが B-P のモデルと E-P のモデルでの無次元化弾性座屈荷重の差として表れていると考えられます。

◆討議 [谷口 与史也 教授]

許容応力度設計で細長比が 200 を超えています、その制限を撤廃し設計した理由は何ですか。

◆回答：一般的に細長比は 150 か 200 未満にするのが通例となっていますが、本研究では、無次元化弾性座屈荷重の比較を精度よくする為に部材設計の際に安全率を揃えるように部材断面を設計しました。その際、短期許容応力度設計法を行う時に式は引用していますが、前述した理由により細長比の制限を無視しています。