

単層2方向格子シェルの座屈挙動に及ぼす膜材料の複合効果に関する研究

Effect of Composite Action on Buckling Behavior for Two-way Single Layer of Single Layer Lattice Shells and Membrane

建築構造学分野 中島宏幸

Abstract

空間構造物の架構形式としてラチス構造は幅広く用いられている。ラチス構造は、比較的小さな部材で大きな表面積の構造が可能で、そのため構造重量は軽くなり、透明度の高い建築物となっている。今後さらなる、大空間構造の大スパン化とそれに伴う軽量化、さらに架構の自在性を追及する1つの方法として、複合化が考えられる。本論では、単層2方向格子シェルに膜材料が座屈挙動にどのような影響を与えるか、幾何学的非線形を考慮した弾性座屈解析を行い比較検討する。その結果、どのモデルにおいても座屈モードは膜材料を張っても、変化は見られなかった。また、部材を細くし、膜材料の剛性に近づけることで、膜材料の効果をより有効に発揮でき、座屈荷重の増加につながることがわかった。

1. 序論

空間構造物の架構形式としてラチス構造は幅広く用いられている。ラチス構造は、比較的小さな部材で大きな表面積の構造が可能で、そのため構造重量は軽くなり、透明度の高い建築物となっている。単層ラチスシェルは複層ラチスシェルに比較して軽量化と接合部の単純化が可能となる。

今後さらなる、大空間構造の大スパン化とそれに伴う軽量化、さらに架構の自在性を追及する1つの方法として、複合化が考えられる。複合構造の研究として、前畑らによる膜材料と二層立体ラチス平板から成るハイブリッド構造の弾性座屈性状が挙げられる。1-4) 膜材料とラチスフレームが一体となったハイブリッド構造について、膜材料の付加により弾性座屈荷重が約40～60%の増加がしたことが明らかになっている。

本論では、単層2方向格子シェルに膜材料が座屈挙動にどのような影響を与えるか、幾何学的非線形を考慮した弾性座屈解析を行い比較検討する。

2. 数値解析概要

2.1 解析モデル

本論で取り扱う解析モデルは、Fig.1に示すように曲率半径30m、半開角30度の円弧アーチを同様のアーチに沿って桁行方向に平行移動させたものとする。Fig.2に解析モデル名称を部材断面方向と使用する部材からアルファベットと数字の組み合わせで表示する。部材断面方向をFig.3に、使用する部材の断面諸元をTable.1に示す。

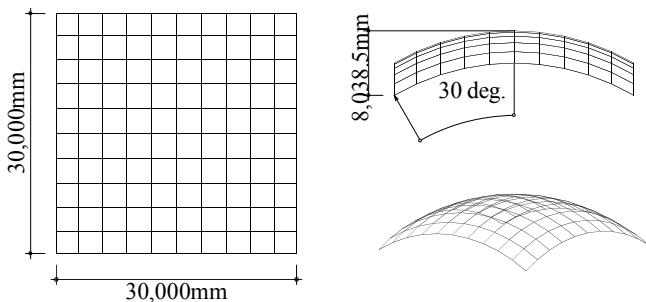


Fig.1 幾何形状

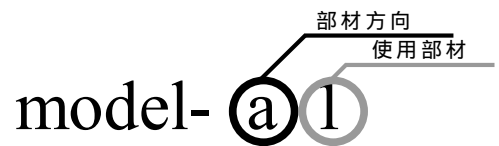


Fig.2 モデル名称

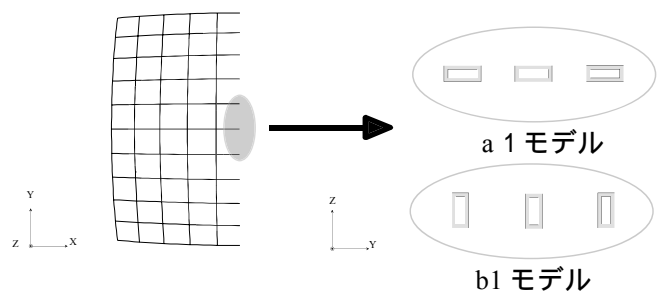


Fig.3 断面方向

2.2 解析条件

本論では境界条件を全モデルについてピン支持とし、Fig.4に示すようにモデルの全周節点のX、Y、Z方向変位を拘束する。荷重は節点集中荷重として取り扱い、Fig.5の様に等分布荷重を想定し、負担面積に応じて各節点に鉛直方向下向きに作用させる。

2.3 解析手法

弾性座屈性状については幾何学的非線形性を考慮した弾性座屈解析によって検討する。

3. 単層2方向格子シェル

各モデルについて行った弾性座屈解析の結果から、弾性座屈荷重、材料効率（弾性座屈荷重を鋼材重量で無次元化した値）をTable.2に示す。また、その材料効率をFig.6に示す。a1モデルとb1モデルの弾性座屈モードをFig.7に示す。どの部材においても、2方向格子の面内剛性を高める方向に部材を配置したaモデルの方が、面外剛性を高める方向に部材を配置したbモデルに比べ、座屈荷重は大きくなっている。座屈荷重はすべての部材共にaモデルは、bモデルの約1.1倍程度となっている。これは、単層2方向格子シェルは単層3方向格子シェルに比べ、面内せん断剛性は低くなり、

全体座屈を起こしやすく座屈強度が低くなるということが関係し、2方向格子の面外剛性を高めるbモデルより、面内剛性を高めることで、座屈荷重を高めることができたと考えられる。また、aモデルもbモデルともに部材を太くするにつれ、座屈荷重は大きくなり、その大きさは、一番細い部材に比べ約1.4倍、2倍となる。単層2方向格子シェルは、個材座屈ではなく全体座屈が起こりやすく、どのモデルにおいても応力状態はモデル全体にほぼ均等となっており全体座屈となっている。aモデルとbモデルと座屈モードを比較してみると座屈モードが変化していることがわかる。面外剛性を高めたbモデルは、円形鋼管を使用した単層2方向格子シェルと同じ座屈モードを示し、全体的に面内方向の変形が顕著となっている。それに対し、aモデルは、面内剛性を高めることにより、面内方向に変形する座屈モードを抑え、面外方向に変形する座屈モードに変化する。その結果、座屈荷重の増加につながったと考えられる。単層2方向格子シェルにおいて、面外剛性を高めるよりも、面内剛性を高めることにより、座屈荷重の増加につながると考えられる。

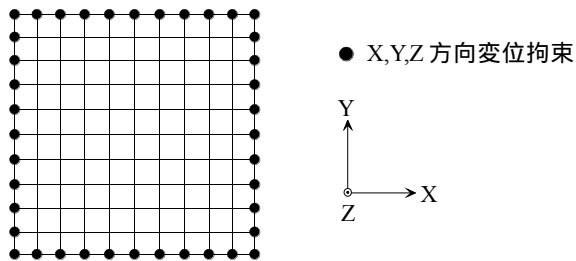


Fig.4 境界条件

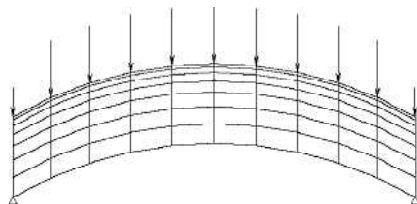


Fig.5 荷重方法

Table.2 弾性座屈荷重

model	座屈荷重 (KN)	鋼材重量 (KN)	材料効率 (座屈荷重/鋼材重量)
a1	147.0	27.5	5.3
a2	212.2	31.1	6.8
a3	294.9	34.8	8.5
b1	128.3	27.5	4.7
b2	186.7	31.1	6.0
b3	258.8	34.8	7.4

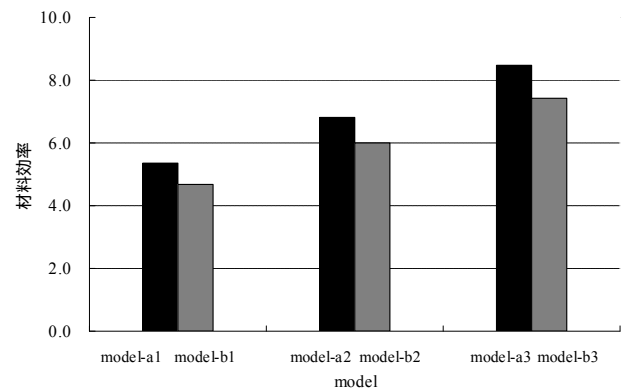


Fig.6 材料効率

Table.1 断面諸元

モデル名	辺の長さ A×B (mm)	厚さ (mm)	部材長さ (mm)	断面面積 (mm ²)	断面2次モーメント (N/mm ⁴)		ヤング係数 (N/mm ²)	せん断 弾性係数 (N/mm ²)	設計基準 強度 (N/mm ²)	細長比	
					I _x	I _y				x	y
model-x1	40×80			517.2	4.21×10 ⁵	1.43×10 ⁵				110.2	189.2
model-x2	45×90	2.3	3140.2	586.2	8.02×10 ⁵	2.08×10 ⁵	2.05×10 ⁵	7.90×10 ⁴	235.0	99.1	170.7
model-x3	50×100			655.2	8.48×10 ⁵	2.90×10 ⁴				87.2	149.5

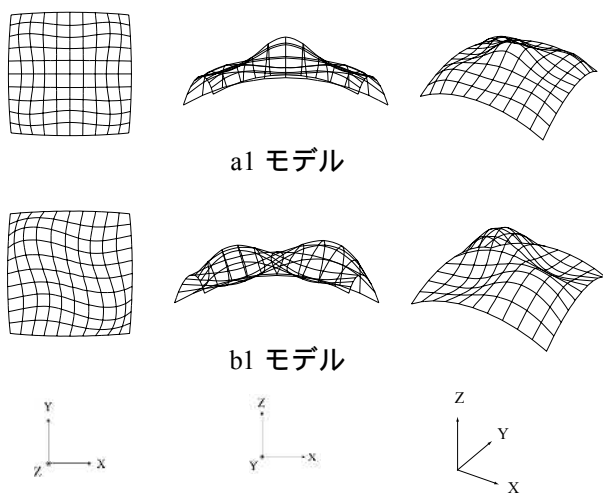


Fig.7 弾性座屈モード

4. 膜材料

単層2方向格子シェルの格子に膜材料を取り付ける。その膜材料の取付図を Fig.8 に示す。a) は全体図を、b) は膜材料と鋼管の拡大図を示している。使用する膜材料は2種類とし、その機械的性質を Table.3 に示す。また、膜材料の繊維方向を Fig.9 に示す。使用する膜材料からモデル名称を Fig.10 のように決定する。膜材料を取り付ける上で、膜材料モデルに 1 N/mm の初期張力を与えるものとする。

5. 単層2方向格子シェルと膜材料から成る複合構造の弾性座屈性状

このモデルについて行った弾性座屈解析の結果から、弾性座屈荷重、材料効率（弾性座屈荷重を鋼材重量で無次元化した値）、単層2方向格子シェルのみに対する膜材料を取り付けた座屈荷重の比率を Table.4 に示す。また、その比率を Fig.11 に示す。

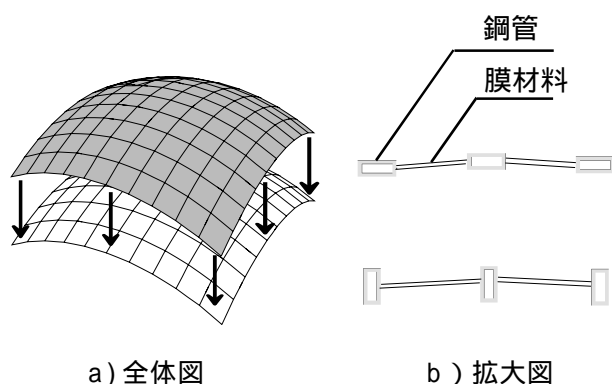


Fig.8 膜材料取付図

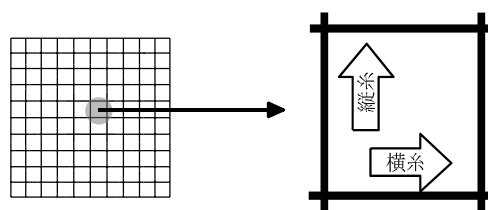


Fig.9 繊維方向

model-a 1-① 使用膜材料

Fig.10 モデル名称

Table.3 機械的性質

膜材料	縦糸方向 引張剛性 $E \cdot t$ (N/mm)	横糸方向 引張剛性 $E \cdot t$ (N/mm)	せん断剛性 (N/mm)	縦糸方向 ポアソン比	横糸方向 ポアソン比	厚さ (mm)
1	501.8	303.8	16.2	0.41	0.25	1
2	675.22	411.2	17.7	0.37	0.23	

Fig.11 からどのモデルにおいても、細い部材に、膜材料を付加することで、その効果は顕著に現れる。部材を細くし、剛性を小さくし、膜材料の剛性に近づけることで、膜材料の効果をより有効に発揮することができ、座屈荷重の増加につながったと考えられる。

フレームのみでは、面内剛性を高めた a モデルの方が、面外剛性を高めた b モデルより弾性座屈荷重は大きくなる。それに対し、膜材料付加にすることで a モデルより b モデルのほうが弾性座屈荷重は増加する。a モデルは、部材断面方向により面内剛性を高めているため、膜材料による拘束効果は比較的小さくなっていると考えられる。それに対し、b モデルは、部材断面方向により面外剛性を高めているため、部材断面方向による面内剛性は低く、膜材料を張ることで面内剛性の増加率は大きくなり、面外、面内ともに剛性が増加したモデルとなる。そのため、鋼管フレームをより有効に拘束し、座屈荷重の増加につながったと考えられる。本論で使用した膜材料は2種類としたが、座屈荷重はあまり変化せず、4 ~ 10kN 程度であった。座屈モードは膜材料を張っても、膜材料を張る前と変化はみられなかった。

初期剛性は膜を張ることで大きくなるが部材を太くなるにつれ、膜を張る前との初期剛性の比率は小さくなる。例として、Fig.12 に a モデルに膜材料1を張ったときの頂部の荷重変形関係を示す。部材が太くなるにつれ、膜材料による拘束効果は比較的小さくなり、細い部材に膜材料を張ることがより効果的であることを確認できる。

Fig.13 に膜材料の中心部の座屈直前の残留張力の初期張力に対する比をパーセント (%) で示す。a1-1 モデル、b1-1 モデルともにモデルの周辺部で初期張力の低下が大きくなっているが、それに対し、モデル中央部付近では、初期張力はあまり抜けていなかった。部材を太くしても、同じ傾向が見られるが、太くするにつれ全体的に残留張力は大きくなる。また、同じ断面の部材を比較すると、どの部材においても a モデルより b モデルのほうが膜材料の初期張力が抜けていた。

6. まとめ

- 1) 部材を細くし、膜材料の剛性に近づけることで、膜材料の効果をより有効に発揮することができ、座屈荷重の増加につながると考えられる。
- 2) どのモデルにおいても座屈モードは膜材料を張っても、変化は見られなかった。

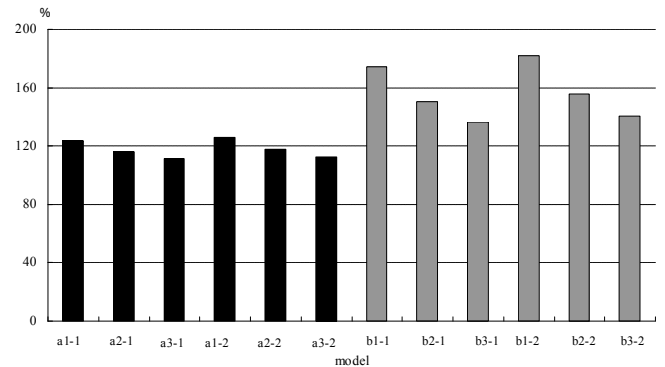


Fig.11 単層2方向格子セルのみに対する膜材料を取り付けた座屈荷重の比率

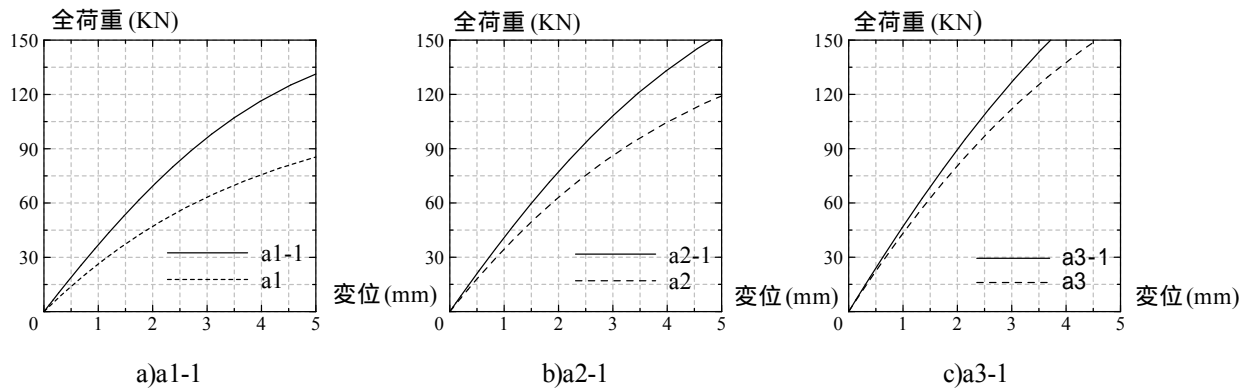


Fig.12 aモデルに膜材料1を張ったときの頂部の荷重変形関係

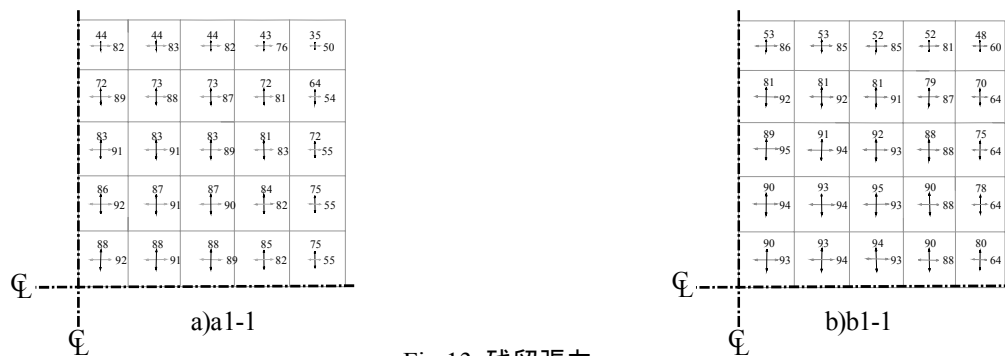


Fig.13 残留張力

Table.4 弾性座屈荷重

model	座屈荷重(KN)	鋼材重量(KN)	座屈荷重/鋼材重量	膜材料による座屈荷重の比率(%)
a1-1	181.9	27.5	6.6	123.7
a2-1	246.1	31.1	7.9	116.0
a3-1	328.3	34.8	9.4	111.3
a1-2	185.2	27.5	6.7	126.0
a2-2	249.5	31.1	8.0	117.6
a3-2	331.9	34.8	9.5	112.5
b1-1	223.5	27.5	8.1	174.2
b2-1	281.0	31.1	9.0	150.5
b3-1	352.8	34.8	10.1	136.3
b1-2	233.4	27.5	8.5	181.9
b2-2	290.9	31.1	9.4	155.8
b3-2	363.1	34.8	10.4	140.3

討議等

討議 [鬼頭 宏明 准教授]

Fig.3、a1 モデル、b1 モデルは具体的にどうなっているのか？

回答：本論で使用した鋼管は、L 型鋼管などの組み合わせではなく、角形鋼管になっています。

討議 [鬼頭 宏明 准教授]

膜材料の想定は？

回答：本論では、研究の手始めとし一膜材料である膜材料C 種を想定し解析を行いました。

討議 [鬼頭 宏明 准教授]

膜とフレームの接合方法は？

回答：本論文では、解析モデルとしての接合方法は、鋼管部材を1部材4要素に分割し、鋼管モデル膜材料モデルの節点を一致させ、鋼管と膜材料は一体で変形するものとし、摩擦や接触は考慮していません。実際の建築物においては、ボルト、金具を介して鋼材中央部で膜材料を固定を想定しています。

討議 [大内 一 教授]

張力を持った膜を張ると、圧縮力がフレームに発生し、そこから雪荷重等の死荷重が載荷されるとフレーム自体は、座屈に対して弱くなるのではないのですか？

回答：本論文では、膜材料を張ることによりフレームのみのモデルより座屈荷重は増加するという結論が得られました。単層2方向格子シェルは、単層3方向格子シェルに比べ、面内せん断剛性が低く、全体座屈が起こりやすいという特性があります。また、座屈モードとして、全体的に面内の変形モードが顕著となっています。発表の範囲外ですが本論文では格子1ユニットを想定し、せん断変形を与え、鋼材に膜材料付加することで面内せん断剛性が鋼管のみと比較すると約1.3倍になるという結果も得られています。その結果、膜材料の拘束効果により本論文で取り扱った単層2方向格子シェルは座屈荷重の増加につながったと考えられます。

討議 [山口 隆 教授]

重量の制約はしていますか？

回答：本論では、単層2方向格子シェルの構造体のみを対象として座屈挙動について考察を行っています。そのため、基礎に対する重量の制約はしていません。

討議 [松村 政秀 講師]

張力の値の決め方は？もっと大きくしたらもっと効果的になるのですか？

回答：本論ではあくまで研究の一環として初期張力を1 N/mmと想定しました。既往の研究により、膜材料に導入する初期張力の違いによる効果の違いについて研究がなされています。そこでは、膜材料の初期張力導入の増加により、座屈モードへの影響は見られないものの、弾性座屈荷重は増加しており、初期張力のコントロールは効果的であると考えます。