

二層立体ラチス平板の個材座屈に及ぼす膜材の配置効果に関する研究

谷口与史也*¹
坂 壽二*²
前畑 徹*³

梗 概

立体ラチス構造に膜材料を仕上げ材として取り付ける場合、弦材の座屈に対する拘束効果が期待できる。しかし空間構造物に利用される膜材料は直交異方性材料であるので、膜材の配置計画によってはその効果が異なると思われる。本研究では膜材取り付け面が圧縮となる二層立体ラチス平板を対象に、膜材の配置の個材座屈に対する拘束効果を理論的に調べている。

1. はじめに

大スパン建築物の屋根などに多く用いられている立体ラチス構造の特徴のひとつは、荷重を節点で受けることであるので、屋根材等の仕上げ材を取り付ける場合には、それを受ける下地部材が必要となってくる。下地部材は材軸直交方向に横荷重を受けるのでほとんどの場合曲げ応力に対して設計されることとなり、ラチス部材よりも大きな断面となる場合がある。この下地部材をラチス部材と一体化するためには、即ち屋根材をラチス部材で直接支持する場合の力学上の長所、短所を調べる必要がある。著者らはこの一体化することによって生じる横荷重の影響のみを次のように調べている。部材の横荷重を考慮して、等分布またはサイン半波分布荷重が作用する部材の座屈撓角式の増分方程式を誘導している¹⁾。ここでは数値計算例としてワーレン型平行弦ラチス梁の弾性座屈挙動に及ぼす構造ユニット数と分布荷重のモデル化の種類との影響を明らかにすると共に、計算時間や記憶容量の低減についての有用性を示している。また簡単な立体ラチス梁の座屈崩壊実験を実施し、提案した増分剛性方程式の妥当性を検証している。次に、部材に分布荷重が作用するラチス構造の弾性座屈挙動を、二層立体ラチス平板、二層屋根型円筒ラチスシェル、単層ラチスドームの3種類の構造物を対象として、構造ユニット数の影響、支持条件の影響、荷重の効果などを数値解析によ

り調べている²⁾。

実際に屋根材や床材をラチス部材と一体化した場合の既往の実験的研究としては、コンクリートスラブと二層立体ラチス平板の上弦材を一体化した場合の複合効果が実験的に調べられており、コンクリートスラブが上弦材の脆性的な非線形挙動を和らげることが示されている³⁾。また金属とセメント材料で構成された薄板と単層格子フレームを一体化した複合構造の実験のおよび理論的研究が実施されており、剛性と強度の増加が示されている⁴⁾。

一方、著者らは圧縮軸力を受ける正方形ラチスフレームにテフロン膜材を取り付けた単位構造について座屈実験を行い、座屈耐力と座屈モードに及ぼす膜材の効果を示し、膜材の無い状態でのラチス構造の座屈荷重と座屈モードを算定し、膜材を効果的に配置することによって、より耐荷力性の高いハイブリッド構造の可能性を示している⁵⁾。理論的な研究としては、2種類の二層立体ラチス平板の上面に膜材を取り付けた場合の座屈荷重と座屈モードの変化を、膜材の織糸方向が弦材に並行な場合と45度の場合の2種類について調べられている。その結果、弦材に平行になるように膜材を取り付けた方が座屈荷重が上昇することが明らかとなった⁶⁾。

そこで本研究では同じ2種類の二層立体ラチス平板の座屈挙動の及ぼす膜材の効果を調べるが、前報ではラチス平板の全面に膜材を一定の方向に取り付けたのに対し

*¹大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 助教授 *²同 教授 *³株式会社ワンズ

て、本論では格子網目毎に膜材の貼り方を変化させて、膜材の取り付けパターンの違いによる座屈挙動に及ぼす効果を調べる。

2. 解析モデル

2.1 ラチスフレーム

膜材とハイブリッド構造を構成するラチスフレームは Fig. 1, 2 に示す正方形網目と菱形網目から成る二層立体ラチス平板を用いる。以降、Fig. 1 に示す正方形網目から成る二層立体ラチス平板を SS 型、Fig. 2 の菱形網目と正方形網目から成る二層立体ラチス平板を DS 型と呼ぶ。

ラチスフレームの各節点は剛接とし、上弦材外縁の部材には正方形断面角型鋼管部材を使用し、他の内側の部材には膜材によるフレーム材の横方向の拘束が期待できるため外縁部材断面の横方向の長さを 1/2 にした角型鋼管部材を用いる。斜材および下弦材については円形断面鋼管部材を用いる。各フレーム部材の断面形状および断面性能を Table1 に示す。

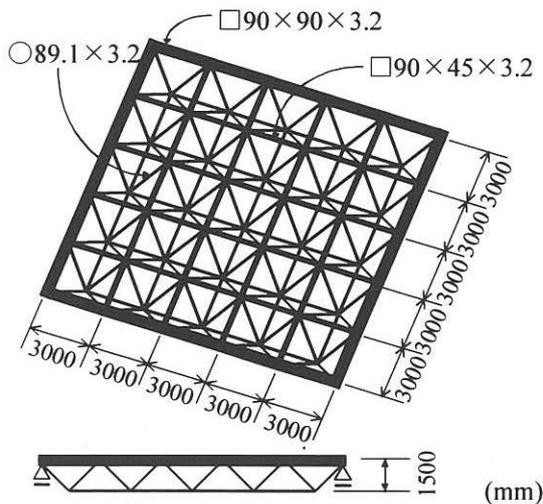


Fig. 1 Square-on-Square Grid

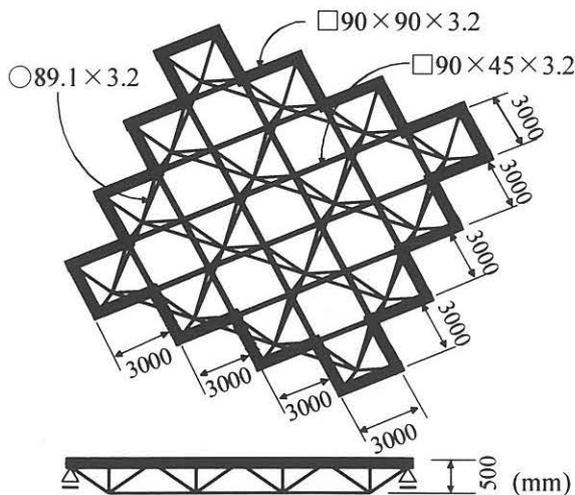


Fig. 2 Diagonal-on-Square Grid

Table1 Mechanical Properties of Latticed Members

Upper chord members		Web members	Lower chord members
Edge members	Inside members		
Section size (cm)			
90×90×3.2	90×45×3.2	89.1×89.1×3.2	89.1×89.1×3.2
Cross sectional area A (cm ²)			
10.850	7.967	8.636	8.636
Geometrical moment of inertia I (cm ⁴)			
135.0	80.2 / 27.0	79.8	79.8
Slenderness ratio			
85.23	94.64 / 163.04	98.68	98.68

2.2 膜材

ハイブリッド化に際して膜材はラチス平板の上面に取り付けるものとし、各上弦材は複数の節点を介して膜材と接続されているとする。ラチスフレームに取り付ける膜材はPTFTコーティングガラス繊維膜材料を想定し、初期張力は 2kgf/cm (19.6N/cm) とする。その機械的性質を Table2 に示す。

ガラス繊維膜材は直交異方性材料であり、非線形性の強い応力歪関係を有する。本研究において、この直交異方性は 4 方向平面トラスを用いてモデル化する⁶⁾。材料非線形性は、取り扱う応力の範囲が狭いことより、無視している。膜材の取り付けに際しては、縦糸方向がラチス部材と並行な場合 (Fig. 3 参照) と 45 度の角度をなす

Table2 Mechanical Property of Membrane

Property & Value	
Tensile stiffness of warp direction Et_w	: 5.93 kN/cm
Tensile stiffness of weft direction Et_f	: 2.67 kN/cm
Shear stiffness G_f	: 0.22 kN/cm
Poisson's ratio regarding warp direction ν_w	: 0.56
Poisson's ratio regarding weft direction ν_f	: 0.25

場合 (Fig. 4 参照) の 2 種類が考えられる。これらの図はひとつのラチス網目を示しており、各ラチス網目に取り付けられる膜材モデルはラチス部材を 4 分割するように部材に 3 つの追加節点が設けられるように設定される。膜材の縦糸がラチス部材に平行になるように SS 型ラチス平板に取り付けたものを SS-P と呼ぶ。ラチス部材に 45 度となるように膜材を取り付けたものを SS-D と呼ぶ。

2.3 膜材の配置

Fig. 5 ~ 14 に示すように、2 つの二層立体ラチス平板についてそれぞれ 5 種類の膜材の配置を考える。図中の矢印は膜材の縦糸方向を示している。SS 型ラチス平板では Fig. 5 ~ Fig. 7 が縦糸方向が弦材に平行なタイプで、Fig. 8, 9 が弦材に対して 45 度になるタイプである。Fig. 6 の場合には縦糸方向と横糸方向が交互に並んだも

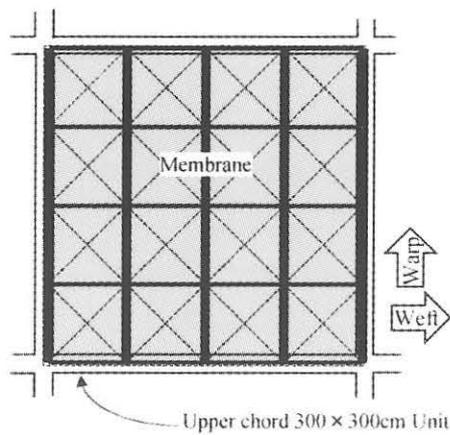


Fig.3 Warp Direction of Parallel Arrangement

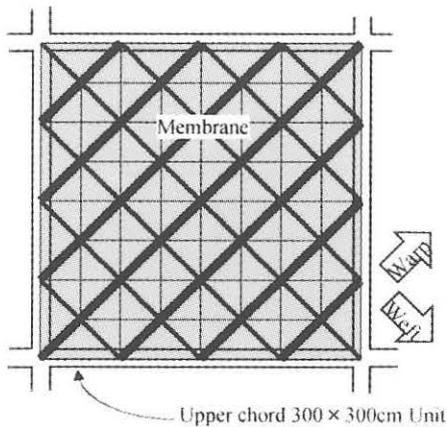


Fig.4 Warp Direction of Diagonal Arrangement

のである。中央の列に横糸方向が一行になる場合も有るが、その場合の拘束効果は明らかに小さいと考えられるので省略する。Fig. 10～14はDS型ラチス平板の場合であり、縦糸が弦材に平行なタイプはFig. 10～12である。Fig. 13, 14は45度のタイプである。DS型についてもFig. 11の配置で中央対角線上に横糸が一行になる場合も有るが、ここでは省略する。

3. 解析結果

ラチス平板は外周節点でローラー支持され、支持節点以外の上面節点に均等な鉛直荷重を作用させる。現実には膜材で受けた荷重はラチス部材に直接伝わると考えられるが、拘束効果のみに着目するためにラチス平板節点のみへの荷重としている。得られた弾性座屈荷重とラチスフレームのみの座屈荷重に対する増加率をTable3に示す。Fig. 15と16は2つのラチス平板の弾性座屈モードを、Fig. 17～26はそれぞれの膜材を取り付けたラチス平板の弾性座屈モードを示す。図中の灰色と白色の色分けは膜材の配置パターンに対応している。また平板中央の四辺形ラチスフレームに対する膜材の拘束パターンを調べるために、Fig. 27とFig. 28に平板中央の四辺形フ

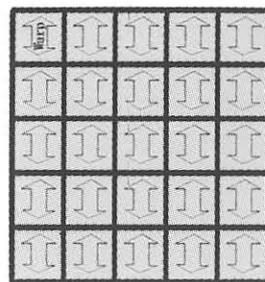


Fig. 5 SS-P-A

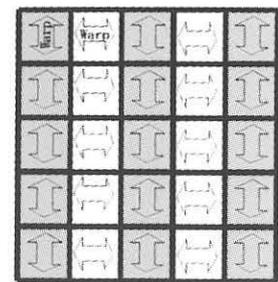


Fig. 6 SS-P-S

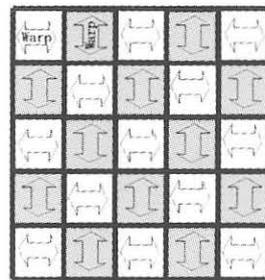


Fig. 7 SS-P-C

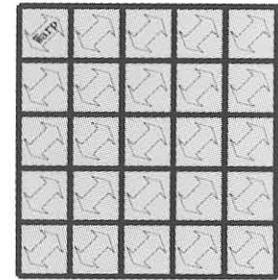


Fig. 8 SS-D-A

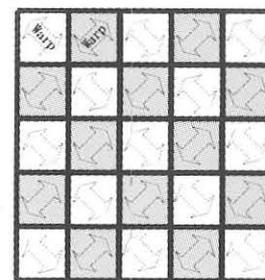


Fig. 9 SS-D-C

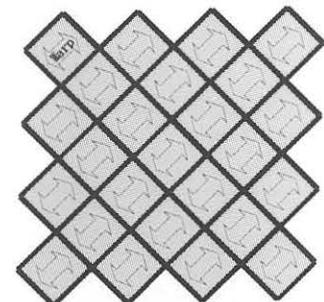


Fig. 10 DS-P-A

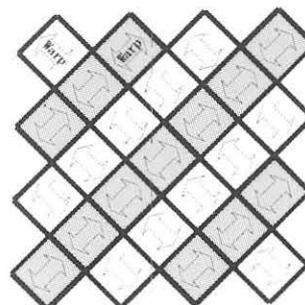


Fig. 11 DS-P-S

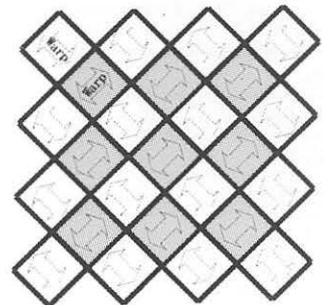


Fig. 12 DS-P-C

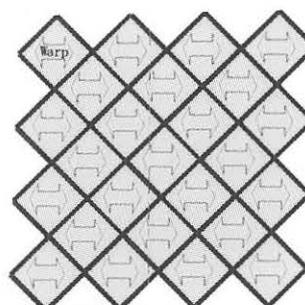


Fig. 13 DS-D-A

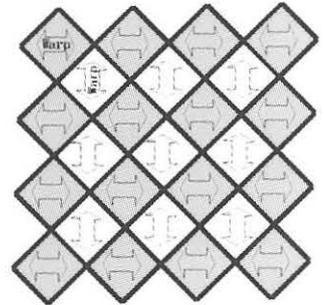


Fig. 14 DS-D-C

レームを含む十文字上の膜材の配置の種類を示している。

SS-Pタイプについて、個材座屈変形は中央の2つの部材に見られ、Fig. 15の十文字形の座屈モードとは異なっている。座屈荷重はSS-P-Sタイプが最も高く、SS-P-Aタイプが最も低い。

最も高いSS-P-SタイプはFig. 27の①と②の関係を有している。すなわちFig. 6の膜材の配置図の平板中央の四辺形フレームを含む十文字方向の膜材の配置パターンを取り出したものであるが、中央からみて一方は縦糸が並んでおり、直交する方向のすぐ隣も縦糸となっている。

これに対して最も低いSS-P-Aタイプは①と④の関係を有しており、④の方向への座屈モードとなっている。すなわち平板中央の四辺形を中心とした十文字方向の一方には縦糸が並んでいるが、直交する方向には横糸が並んでいるので、拘束の弱い横糸方向へ座屈している。

SS-P-Cタイプでは②と③の組み合わせであり、③の方向への座屈モードとなっている。①と②の組み合わせは

Table3 Elastic Buckling Load

Structural System	Elastic Buckling Load (kN)	Increase Rate (%)
SS	2075.1	-----
SS-P-A	3818.7	84.0 ①④
SS-P-C	3897.8	87.8 ②③
SS-P-S	4109.4	98.0 ①②
SS-D-A	3231.9	55.8
SS-D-C	3188.4	53.7
DS	1803.2	-----
DS-P-A	3437.1	90.6 ①④
DS-P-C	3521.7	95.3 ②③
DS-P-S	3518.6	95.1 ①②
DS-D-A	2976.1	65.0
DS-D-C	2958.5	64.1

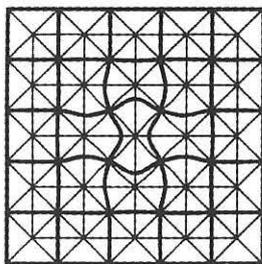


Fig. 15 Elastic Buckling Mode of SS grid

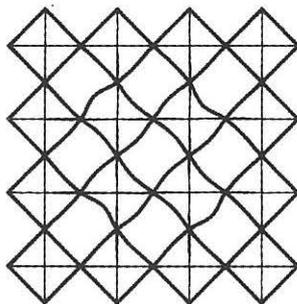


Fig. 16 Elastic Buckling Mode of DS grid

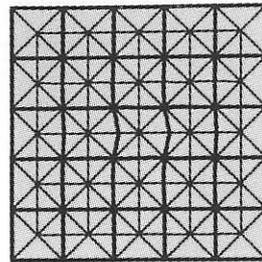


Fig. 17 Elastic Buckling Mode of SS-P-A Hybrid

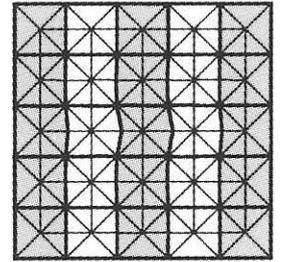


Fig. 18 Elastic Buckling Mode of SS-P-S Hybrid

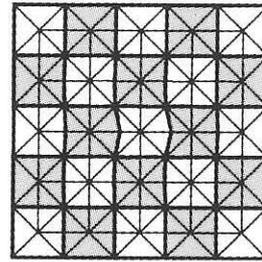


Fig. 19 Elastic Buckling Mode of SS-P-C Hybrid

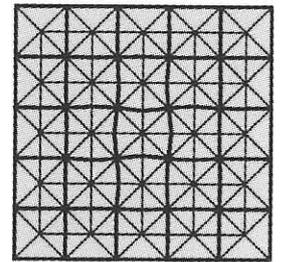


Fig. 20 Elastic Buckling Mode of SS-D-A Hybrid

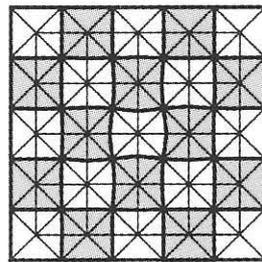


Fig. 21 Elastic Buckling Mode of SS-D-C Hybrid

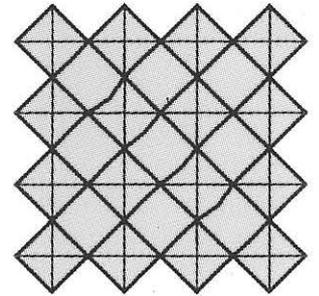


Fig. 22 Elastic Buckling Mode of DS-P-A Hybrid

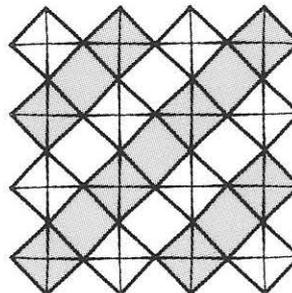


Fig. 23 Elastic Buckling Mode of DS-P-S Hybrid

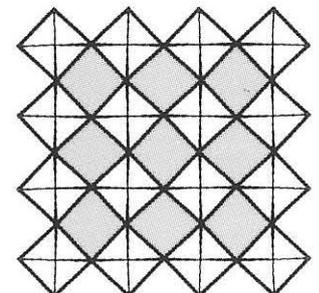


Fig. 24 Elastic Buckling Mode of DS-P-C Hybrid

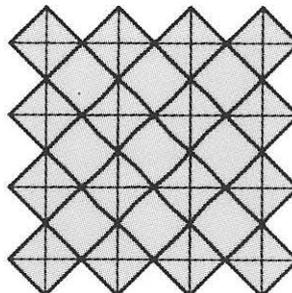


Fig. 25 Elastic Buckling Mode of DS-D-A Hybrid

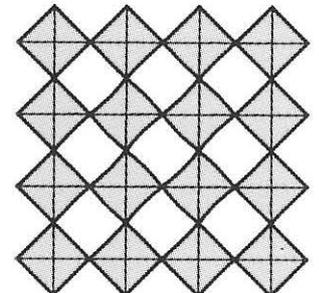


Fig. 26 Elastic Buckling Mode of DS-D-C Hybrid

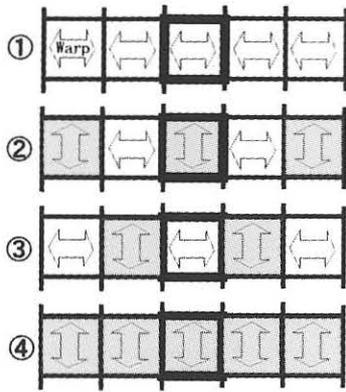


Fig.27 Relation of Warp Direction against Buckling Member for SS-P

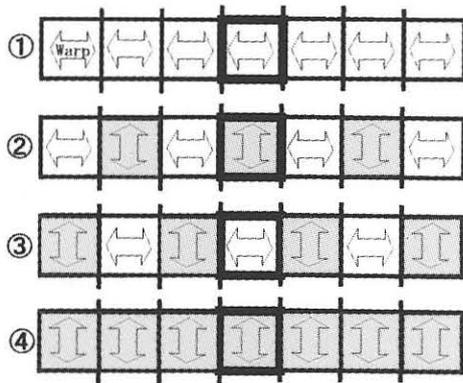


Fig.28 Relation of Warp Direction against Buckling Member for DS-P

膜材の縦糸でラチス平板の中央の上弦材4本とも拘束するので最も効果が大きく、①と④の組み合わせでは一方は縦糸で拘束しているが他方は横糸で拘束しているの、その効果が小さくなると言える。②と③の組み合わせはその中間であると言える。

DS-P-AタイプではFig. 28の①と④の組み合わせで、④の方向への座屈モードとなっている。DS-P-CタイプとDS-P-Sタイプは②と③、①と②の組み合わせであるが、いずれも座屈モードは個材座屈ではなく、構造ユニットが交互に面内回転する節点移動する座屈モードとなっている。従って、DS型ラチス平板の場合には④以外の組み合わせでは拘束効果は高いと言える。

次に膜材の縦糸方向を上弦材に対して45度となるように膜材を配置した場合についてみると、各タイプとも座屈荷重の増加率は先述の平行な場合と比べてかなり小さい。これは繊維構造では糸方向に対して45度方向の引張剛性は小さくなり、拘束効果が少ないためと言える。こ

のことはSS型ラチス平板のFig. 20,21, DS型ラチス平板のFig. 25,26の座屈モードより、どの配置にしてもラチスフレームだけの場合の座屈変形を拘束するに至っていないことから分かる。

4. まとめ

2種類の二層立体ラチス平板の上面に膜材を取り付けた場合のラチスフレームの座屈挙動の及ぼす膜材の効果を調べた。その際、ラチス平板の格子網目毎に膜材の貼り方を変化させた。本研究の範囲で得られた結論を以下に示す。

(1) SS-Pタイプでは拘束効果の高い縦糸方向で座屈部材を拘束したもののほど弾性座屈荷重は大きく、拘束効果の弱い方向へ座屈モードが現れる。

(2) DS-Pタイプでは座屈変形の大きい部材を縦糸で拘束したもののほど座屈荷重は大きくなり、座屈モードは節点移動座屈モードに移行する。

(3) 繊維方向を弦材と45度となるように膜材を配置した場合には、座屈荷重の増加率は小さく、座屈モードの変化は見られない。

[謝辞]本研究の一部は(財)能村膜構造技術振興財団の平成9年度研究助成金によるものである。

[参考文献]

- 1)Yoshiya TANIGUCHI, Hideto TANAKA and Toshitsugu SAKA, 「Tangent Stiffness Equations for Laterally Distributed Loaded Members」, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 125, 5, pp.537-544, May, 1999.
- 2)谷口与史也, 坂壽二, 「部材に分布荷重が作用するラチス構造の弾性座屈挙動」, 日本建築学会構造系論文集, 第534号, pp.79-85, 2000.
- 3)El-Sheikh, A. I. and McConnel, R. E. (1993), 「Experimental Study of Behavior of Composite Space Trusses」, *Journal of Structural Engineering*, Vol.119, No.3, ASCE, 747-766.
- 4)H.L.Zhao,X.M.Cao,M.Q.Qian,Q.Yang,J.Ma and C.Q.Zhao, 「Theoretical Analysis of the Sheet Space Structure System and Engineering Practices」, *Space Structures 4, Proc. of the Fourth International Conference on Space Structures*, University of Surrey, Telford, London, Vol.1, pp. 89-98,1993.
- 5)谷口与史也, 坂壽二, 南宏和, 「膜材料とラチスフレームから成るハイブリッド構造の基礎的研究」, 日本建築学会構造系論文集, 519, pp.71-77, 1999.
- 6)谷口与史也, 坂壽二, 前畑徹, 「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」, 膜構造研究論文集, No.13, pp.33-41, 1999.

SYNOPSIS

As a new structural system for spatial structures, a hybrid structure consisting of membrane and space frames was already presented. In this case, membrane as well as latticed members is taken into account as a structural element and play a role in restraining the member buckling, to increase the buckling strength of the whole structure. The membrane materials used in spatial structures are usually PTFT coated glass fiber fabrics being orthotropic. Then in this paper, the effect of membrane arrangement on the elastic buckling load and buckling mode is numerically investigated for double-layer grids of two types. The membrane arrangement of 5 types is adopted for each grid. As a result, the buckling mode can be changed by some membrane arrangements and the buckling strength increase in the range of 54-98% higher than the double-layer grids without membrane.

*¹Assoc.Prof.,Dept. of Urban Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka City University, Dr.Eng.

*²Prof.,Dept. of Urban Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka City University, Dr.Eng.

*³ONES Co. Ltd.