

膜材料と二層屋根型円筒ラチスシェルから成る ハイブリッド構造の座屈崩壊実験

谷口 与史也*1

坂 壽二*2

佐竹 知希*3

梗 概

近年の大空間構造物は更なる大スパン化、軽量化の道を歩む一方、架構のデザイン面への要求も増してきており、その方策の1つとして仕上げ材と構造体が一体となることによるハイブリッド構造が有効であると考えられる。そこで本論は、膜材と二層屋根型円筒ラチスシェルのハイブリッド構造を対象とし、膜材を取り付けた状態と膜材を取り付けない状態での座屈崩壊実験を行い座屈荷重または座屈モードへの膜材の効果を調べる。また実験と同じハイブリッド構造に関して膜材の弾性座屈挙動に及ぼす効果を数値解析によって検討する。その結果、膜材は弦材の補剛効果を果たし、座屈荷重を増加させ、座屈モードは構面内から構面外へ変化することを示している。

1. はじめに

ハイブリッド構造とは、単一の構造で構成しないで、多種類の部材や構造システムを組み合わせて作られるものである。それによって、構造の安全性、施工性、経済性、建築空間の自由度等を高めることが可能になるという利点が多くある。まず部材レベルでのハイブリッド化として挙げられるのは、鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)、コンクリート充填鋼管部材(CFT)、アンボンドブレースなどであり、これらの研究は早くから盛んに行われてきている¹⁾。また、構造形式のハイブリッド化として挙げられるのは、張弦梁構造などがある。曲げとせん断で力を支点到に伝達する梁構造とロッドの高張力を利用したテンション構造を複合化したもので、力学的に高度な合理性を追求され複合化されたもので、この構造によって大スパンを軽快に架け渡すことができるようになっている。このように、近代建築の中でハイブリッド構造が今後とも構造システムの中で注目されていくと考えられる。また、構造の合理性と建築デザインの接点を探ることは重要であり、ハイブリッド構造は、その有力な候補のひとつであると考えられる。

空間構造については、四角形格子の単層ラチスドームにセメント板を取り付けた実験が実施されており、そのセメント板が構造物全体の剛性と載荷能力に重要な役割を果たしていることが報告されている²⁾。

著者らは対象とする膜材と立体ラチスから成るハイブリッド構造について、まずハイブリッド構造の空間構造への適用の基礎的研究として圧縮軸力を受ける正方形ラチスフレームに膜材を直接取り付けられた1構造ユニットの座屈崩壊実験を行い、ラチス部材に膜材料が連続的に接合された場合のラチスフレームの座屈挙動に及ぼす膜材の効果を実験的に明らかにし、さらに数値解析によって弾性座屈荷重と座屈モードを算定し、実験結果と比較考察している。その結果、座屈荷重に関しては約15%上昇することを示している³⁾。次に、上弦材、下弦材共に正方形網目から成るSS(Square on Square)型二層立体ラチス平板と上弦材が菱形網目、下弦材が正方形網目から成るDS(Diagonal on Square)型二層立体ラチス平板と膜材料が一体となったハイブリッド構造について、有限要素解析によって弾性座屈荷重と座屈モードを算定し、膜材料がラチスフレームの座屈挙動に及ぼす効果を明らかにしている。その結果、弾性座屈荷重に関して約40~60%上昇することを示している⁴⁾。

そこで本論文では、二層屋根型円筒ラチスシェルに用いて膜材を取り付けた状態と膜材を取り付けない状態で載荷実験を行い、ラチスフレームの座屈挙動に及ぼす膜材の効果を調べる。また、膜材を線材にモデル化した有限要素解析によって弾性座屈荷重と座屈モードを算定し、実験結果と比較考察する。

*1 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 助教授・工博

*2 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 教授・工博

*3 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 前期博士課程

2. ハイブリッド構造試験体

2.1 ラチスフレーム

ハイブリッド構造を構成するラチスフレームはFig.1に示す円筒型のトラス板である。桁行き方向が2094mm、アーチ方向が1818mm、半開角が30度の形状となっている。各部材は上弦材が矩形のアルミニウム材、下弦材と斜材は円形鋼管を用いている。部材の各諸元をTable1に示す。

Table1 Mechanical property of frame

Aluminum member in boundary ${}^w6 \times {}^h12\text{mm}$	Length	303.4	mm
	Axial rigidity EA	3.96×10^3	kN
	Flexural rigidity EI_y	4.91×10^4	$\text{kN} \cdot \text{mm}^2$
	Flexural rigidity EI_z	1.29×10^4	$\text{kN} \cdot \text{mm}^2$
Aluminum member in non-boundary ${}^w6 \times {}^h12\text{mm}$	Length	303.4	mm
	Axial rigidity EA	3.72×10^3	kN
	Flexural rigidity EI_y	4.68×10^4	$\text{kN} \cdot \text{mm}^2$
	Flexural rigidity EI_z	1.20×10^4	$\text{kN} \cdot \text{mm}^2$
Steel tubular member ${}^d5 \times {}^t1\text{mm}$	Length	303.4	mm
	Axial rigidity EA	2.13×10^3	kN
	Flexural rigidity EI	5.28×10^3	$\text{kN} \cdot \text{mm}^2$

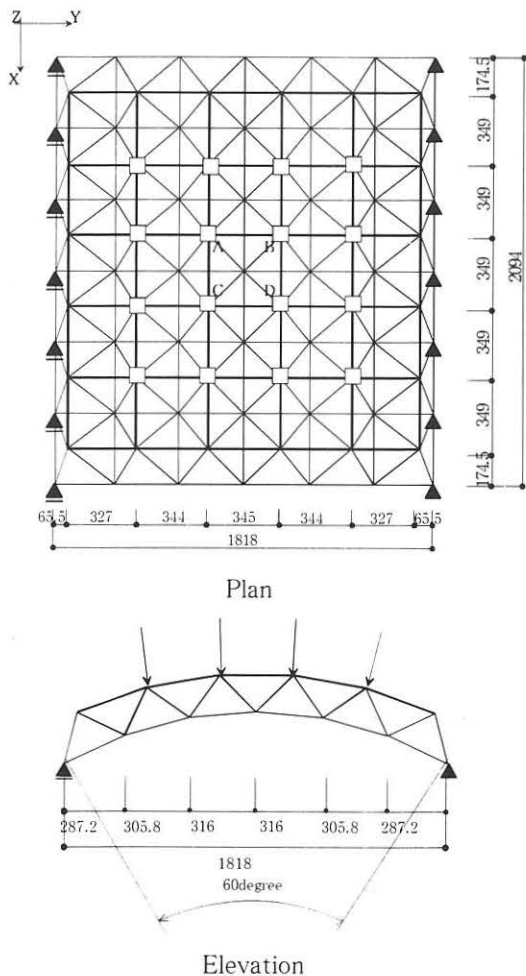


Fig.1 Truss frame of hybrid structure (mm)

2.2 膜材料

ハイブリッド構造に用いる膜は白色のC種膜材を用いる。取り付けの膜材の加工寸法図をFig.2に示し、膜材の特性はTable2に示す。膜材はFig.1に示すラチス部材で構成された二層屋根型円筒ラチスシェルの上弦材に取り付けるものとする。膜材とラチス部材の接合方法として、膜材にしわが発生しないように張力を導入しながら、中央部から周辺部に向かってねじで固定する。膜材の上弦材への固定の様子はFig.3に示しているように、各節点と上弦材1本あたり7箇所固定し、上弦材の境界部は上弦材とL形アングルによって膜材を固定する。

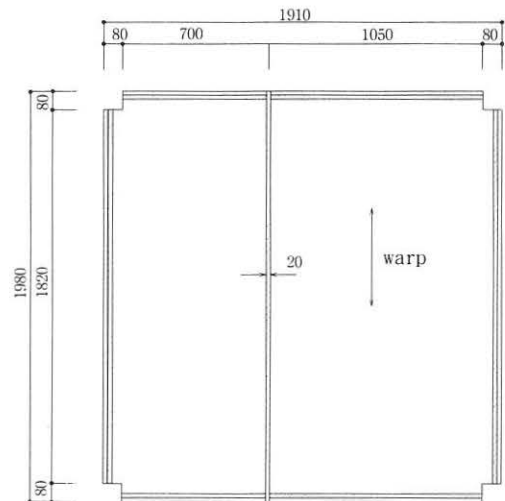


Fig.2 Membrane of hybrid structure (mm)

Table2 Mechanical property of membrane

PVC coated polyester fiber fabrics		
Tensile stiffness of warp Et_w	312	kN/m
Tensile stiffness of weft Et_f	202	kN/m
Shear stiffness G_t	9.5	kN/m
Poisson's ratio regarding warp direction ν_w	0.29	
Poisson's ratio regarding weft direction ν_f	0.19	

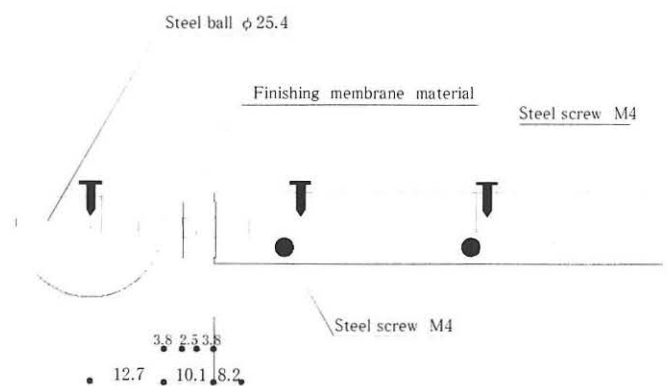


Fig.3 Detail of upper chord member (mm)

2. 3 接合部形式

本実験で使用した接合部をFig.4に示す。接合部はねじ込み接合形式³⁾のシステムトラス部材と球形のノードで構成されている。接合部は直径25.4 mmの剛製球で、直径4 mmのねじ穴を設けている。Fig.5に実験モデルと解析モデルの対応を示す。またTable3で接合部の特性を示す。

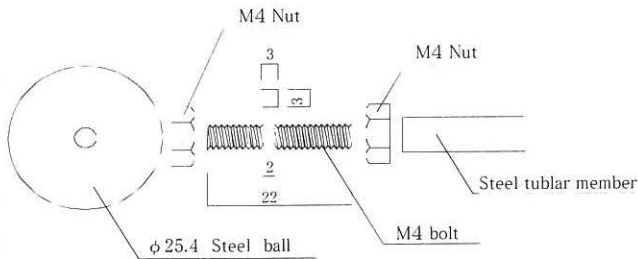


Fig.4 Detail of joint (mm)

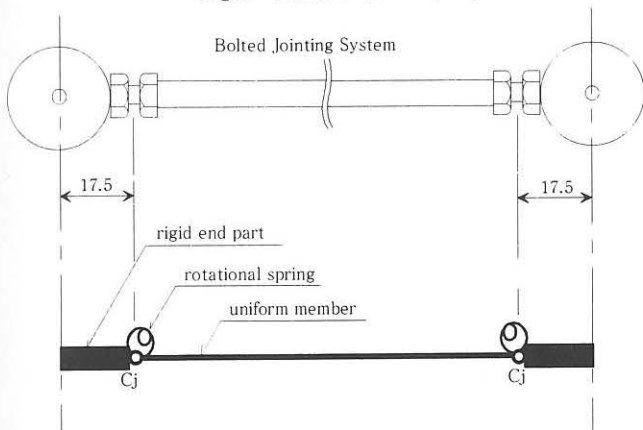


Fig.5 Experiment model and analysis model (mm)

Table3 Mechanical property of joint

Steel ball joint	Diameter	25.4	mm
	Rigid zone length	17.5	mm
Screw joint	Rotation connecting rigidity	7.61×10	$\text{kN} \cdot \text{mm}$

3. 実験概要

3. 1 载荷方法

Fig.1に示している二層円筒屋根型ラチスシェルの上層部の16の節点(□)に曲率中心に向かって均等な荷重を作用させる。各節点に均等に荷重をかけるためにトーナメント方式を採用する。载荷には油圧形式の押し引き両用の負荷装置を使用した。荷重はロードセルで検出する。(Photo.1 参照)

3. 2 支持条件

試験体の境界である周辺部の支点は、Fig.1に示すように一方の支点を3次元载荷装置に治具を用いてボルトで固定し、ピン支持(▲)とする。もう一方の支点は直径数mmの剛性球を十数個はさんだ台座を置き、ローラー支持(▲)とし

て実験を行っている。

3. 3 測定方法

支点との相対変位を測定するために、試験体の上部に変位測定用トラスを架け渡し、Fig.1に示すようにの上層部の頂部4節点(A~D)に変位計(東京測器研究所CDP25)をセットし、それぞれの節点の鉛直変位を測定する。また、下層部の中央の節点の鉛直変位も測定する。これらの鉛直変位と、ロードセルより記録される荷重を記録していく。また、载荷の均等性を調べるために下層部に静歪みゲージを取り付け、歪み量を測定する。さらに、上弦材やウェブ材の変形を肉眼で観察し、座屈後の残留変形を調べる。

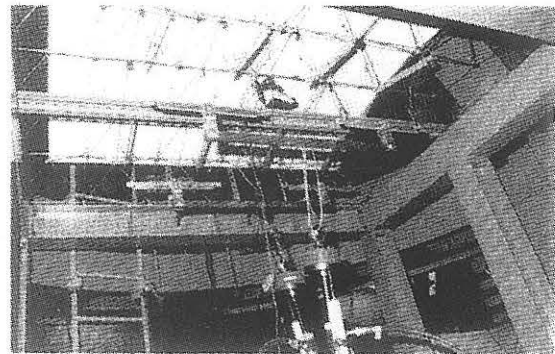


Photo.1 Loading system

4. 実験結果

4. 1 ラチスフレームの座屈実験結果

ハイブリッド構造の実験に先立って、ラチスフレームのみの場合の座屈実験を行った。得られた座屈荷重をTable4に示す。また試験体の頂部節点の荷重変形関係をFig.6に示す。縦軸は上層部16節点に作用させた全荷重値で、横軸は各節点の変位量を表している。変位量は下向きを正としている。

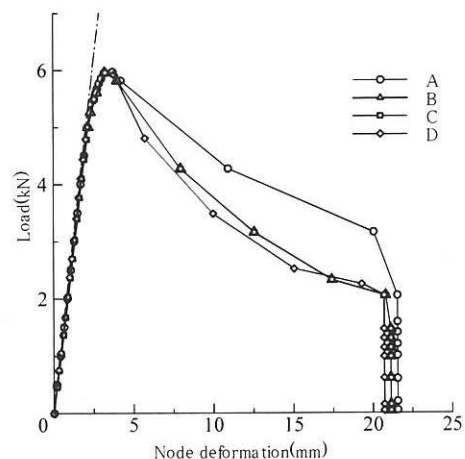
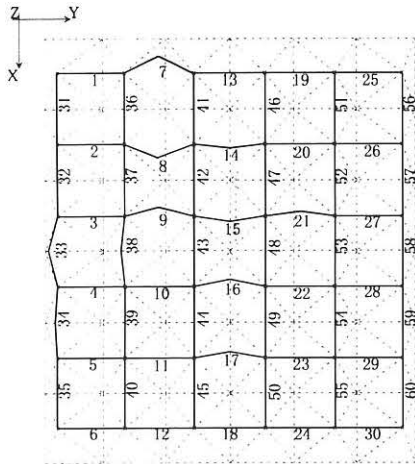


Fig.6 Load-deformation relationship of truss frame

座屈挙動は、最大荷重付近で上層部の中央の部材で個材の座屈モードが見られた。実験後の残留変形に関してFig.7とPhoto.2に示す。残留変形からも分かるように座屈した部材の座屈変形方向はほぼ水平面内方向であった。Fig.7～Fig.9におけるZ方向は上向きを正とし、またそれぞれの表の単位系はmmとする。

4. 2 ハイブリッド構造の座屈実験結果

ラチスフレームのみの実験に用いたのと同様のモデルに膜材を取り付けた状態で2体座屈実験を行っている。得られた座屈荷重をTable 4に示す。また荷重変形関係をFig.10、Fig.11に示す。



部材番号	X方向	Y方向	Z方向
7	-77.0	0.0	+2.0
8	+65.0	0.0	0.0
9	-44.0	0.0	-1.0
14	+19.0	0.0	-4.0
15	+29.0	0.0	-7.5
16	-37.0	0.0	-2.5
17	-25.0	0.0	-7.0
19	0.0	0.0	-0.25
21	-2.0	0.0	0.0
33	0.0	-4.5	0.0
34	0.0	-1.5	-0.15
38	0.0	-1.5	0.0
54	0.0	0.0	-0.3

Fig.7 Residual deformation of truss frames

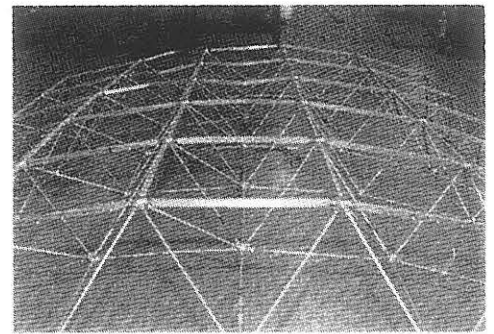
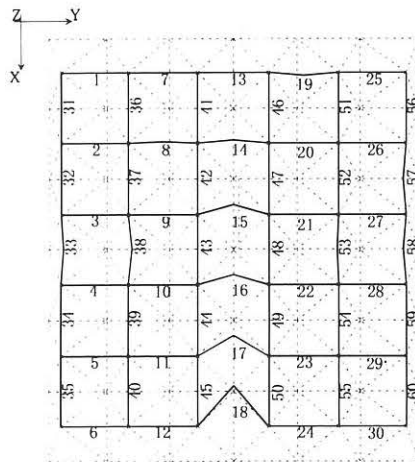


Photo.2 Residual deformation of truss frames



部材番号	X方向	Y方向	Z方向
8	-1.0	0.0	0.0
14	-2.0	0.0	-18.0
15	-10.0	0.0	+19.3
16	-11.0	0.0	-34.5
17	-24.0	0.0	+29.3
18	-50.0	0.0	-85.0
19	-1.0	0.0	-0.25
33	0.0	+1.0	-0.15
38	0.0	+2.0	0.0
53	0.0	-1.0	-0.25
57	0.0	-1.0	-0.15
58	0.0	-1.0	0.0

Fig.8 Member Residual deformation of hybrid structure No.1

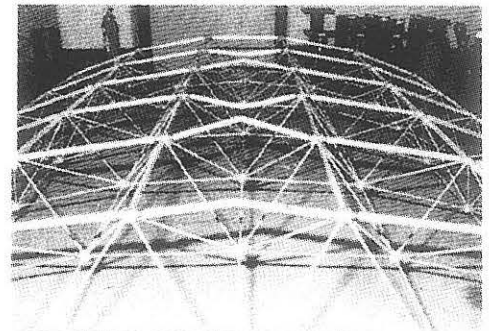
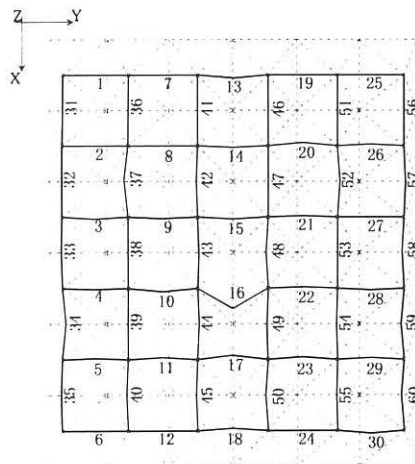


Photo.3 Member Residual deformation of hybrid structure No.1



部材番号	X方向	Y方向	Z方向	部材番号	X方向	Y方向	Z方向
3	0.25	0.0	0.0	31	0.0	0.75	0.4
4	0.15	0.0	0.15	32	0.0	0.0	0.2
5	-0.15	0.0	0.0	33	0.0	-0.15	0.2
8	0.0	0.0	-0.15	34	0.0	0.4	0.15
9	0.2	0.0	0.15	35	0.0	-0.15	0.15
10	0.4	0.0	0.0	37	0.0	-0.5	0.0
11	-0.25	0.0	0.0	40	0.0	-0.2	0.0
12	0.0	0.0	0.15	42	0.0	0.15	0.0
13	4.0	0.0	0.0	43	0.0	0.15	0.0
14	0.2	0.0	0.2	44	0.0	0.2	0.0
15	0.25	0.0	0.0	45	0.0	-0.15	0.0
16	2.5	0.0	18.0	48	0.0	-0.25	0.0
17	-0.5	0.0	0.35	49	0.0	-0.15	0.0
18	-0.3	0.0	0.0	50	0.0	-0.3	0.0
20	-0.35	0.0	0.0	52	0.0	0.3	0.0
21	-0.15	0.0	0.0	54	0.0	-0.15	0.0
22	-0.15	0.0	0.0	55	0.0	-0.15	0.0
23	-0.3	0.0	0.0	58	0.0	-0.25	0.2
26	-0.2	0.0	0.0	59	0.0	-0.4	-0.15
28	-0.2	0.0	0.0	60	0.0	-0.035	0.2
29	-0.2	0.0	0.0				
30	0.35	0.0	0.0				

Fig.9 Member Residual deformation of hybrid structure No.2

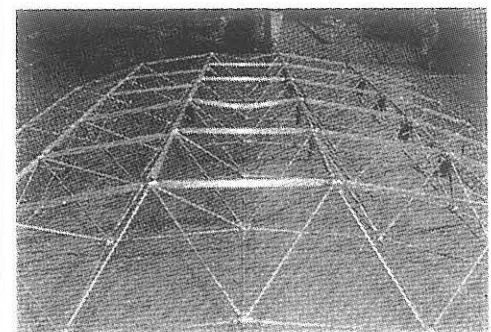


Photo.4 Member Residual deformation of hybrid structure No.2

Table4 Buckling load by experiments

Structure System	Truss	
	frame	frame+Membrane
Buckling Load(kN)	P_{fr} 6.16	P_{hb} 11.5 (No.1) 11.8 (No.2)
Ratio of increase P_{hb}/P_{fr} (%)	-----	186.7 191.6

荷重変形関係に関しては、最大荷重に達した後、耐力が急激に低下しており、その傾向はラチスフレームの場合よりも大きいと言える。

また膜材の挙動に関しては、最大荷重付近で荷重が作用するにつれて初期導入張力の低下によるしわの発生が中央部のユニットに見られた(Photo.5参照)。しかし境界部のユニットに関しては、顕著な張力の低下は見られなかった。座屈挙動は、最大荷重付近で上層部の中央の部材で個材の座屈モードが見られた。実験後の残留変形に関してFig.8、Fig.9とPhoto.3、Photo.4に示す。残留変形からも分かるように座屈した部材の座屈変形方向は鉛直方向である。

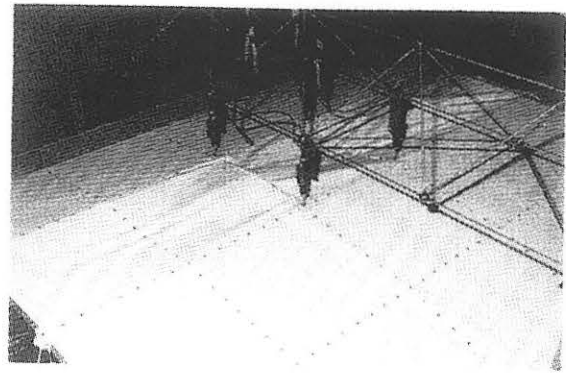


Photo.5 Wrinkling of membrane at buckling load

4. 3 座屈実験結果の比較考察

ラチスフレーム、ハイブリッド構造とも最大荷重までの荷重変形曲線においては大きな違いは見られていない。また最大荷重を比較すると、ラチスフレームだけの場合に対してハイブリッド構造は約189.2%であることが確認できる。

座屈後挙動に関しては、耐力の低下はハイブリッド構造のほうが顕著に表れており、除荷域ではハイブリッド構造では変位の減少が見られている。座屈モードはラチスフレームだけの場合は水平面内の座屈変形モードであるが、ハイブリッド構造の場合には圧縮水平部材の座屈変形は鉛直方向への座屈モードであることから、膜材によって座屈モードが変化し、座屈荷重が上がったと言える。

またFig.10、Fig.11中の一点鎖線は解析における初期剛性を表しているが、ラチスフレームのみの場合、ハイブリッド構造とも実験結果と解析結果が一致している。

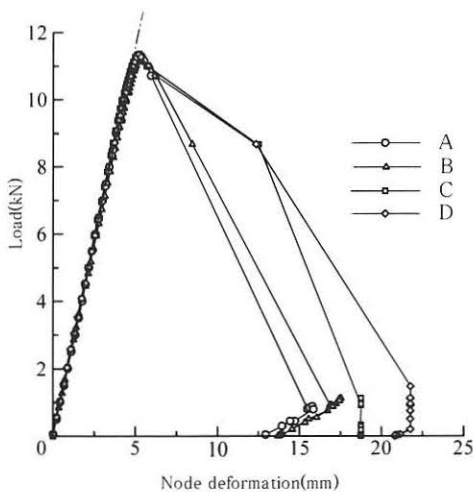


Fig.10 Load-deformation relationship of hybrid structure No.1

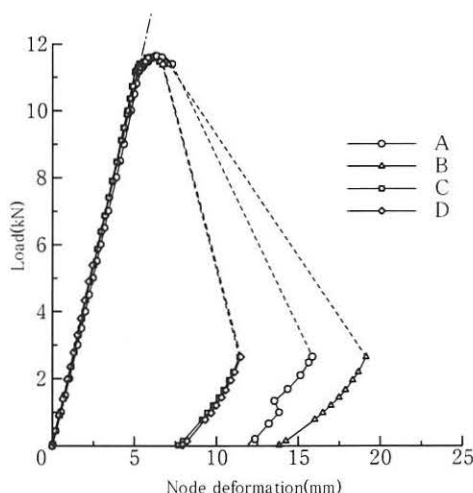


Fig.11 Load-deformation relationship of hybrid structure No.2

5. 弾性座屈解析結果

5. 1 膜材料の線材置換

ハイブリッド構造の弾性座屈荷重を算定するにおいて、織糸で構成されている膜材料を線材に置換するモデルを用いることにする。モデル化に関しては膜材料を直交異方性トラスとして取り扱う⁶⁾。

解析に用いた膜材の要素分割と線材置換モデルの各剛性を上層中央部の1ユニットを例に取りFig.12に示す。

膜材料のラチスフレームへの取り付けに関しては、フレームの上弦材に膜材を取り付け、フレーム上弦1部材を4分割し、中間節点を設け、その節点に膜材料の置換トラスを取り付けることにした。張力の導入方法は、実際に膜材を取り付ける際に人間の力で膜材を周囲から引張りラチスフレームに取り付けたことから、人間1人あたりが1ユニットに加える張力を20kgfとして張力を導入して解析を行っている。また解析で用いる膜材の曲げ剛性を単位面積当たりにおけるフレーム材の曲げ剛性の1/1000の値を用いる。

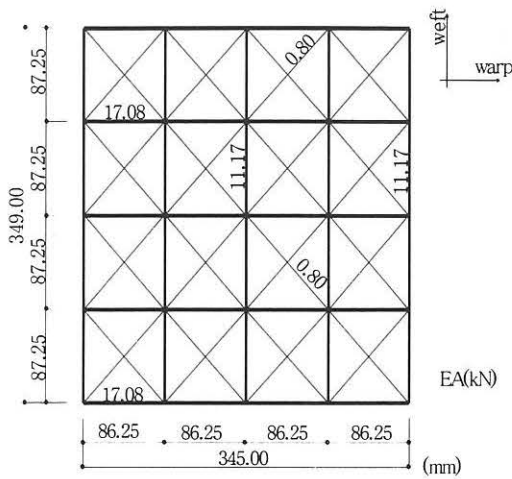


Fig.12 Numerical model of membrane in 1unit

5. 2 弾性座屈解析結果

本論では座屈撓角法を用いた弾性座屈解析を行う。得られた弾性座屈荷重を Table5、Table6 に示す。

Table5 Elastic buckling load of truss frame

	Truss frame(kN) Torsional rigidity ratio 0.01	Truss frame(kN) Torsional rigidity ratio 1.0
Buckling load	6.73	7.09
Ratio of increase(%)	-----	108.4
Comparison of experiment result(%)	109.3	115.1

Table6 Elastic buckling load of hybrid structure

	Hybrid structure(kN) Torsional rigidity ratio 0.01	Hybrid structure(kN) Torsional rigidity ratio 1.0
Buckling load	10.6	12.3
Ratio of increase(%)	-----	116.5
Comparison of experiment result(%)	90.8	105.8
Comparison of truss frame analysis(%)	157.2	173.9

Table5、6より解析で得られた弾性座屈荷重はねじり剛性率が0.01の時は、ハイブリッド構造はラチスフレームのみの場合に対して約157%の値を示している。これを先の実験で得られた最大荷重と比較すると、解析で得られた弾性座屈荷重は実験値に対してはラチスフレームのみの場合は約109%、ハイブリッド構造のほうは約91%の値を取っている。次にねじり剛性をパラメータに取り、解析を行った結果を見ると、ハイブリッド構造の弾性座屈荷重はねじり剛性率が0.01の時に限ってはラチスフレームの結果に対して約157%、ねじり剛性率が1.0の時に限っては約174%となっている。つまりねじり剛性率は弾性座屈荷重に影響するといえる。

ラチスフレームのみの場合、ハイブリッド構造の場合の弾性座屈モードを、Fig.13、Fig.14に示す。これはねじり剛性率が0.01

における座屈モードである。ラチスフレームのみの場合には面内方向の十字型の座屈モードが得られており、ハイブリッド構造では上弦材中央の部材に一字型の鉛直方向へのジグザグの座屈モードが得られた。これは実験で得られた座屈モードと一致している。

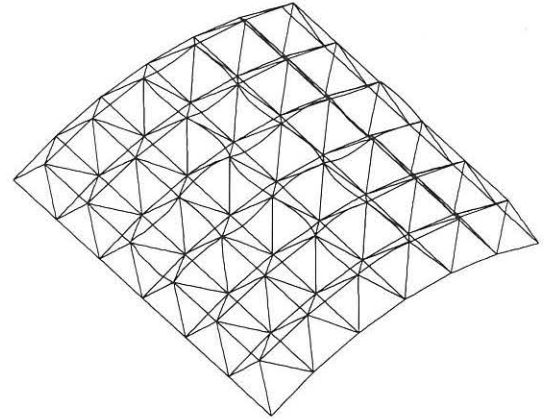


Fig.13 Buckling mode of truss frame

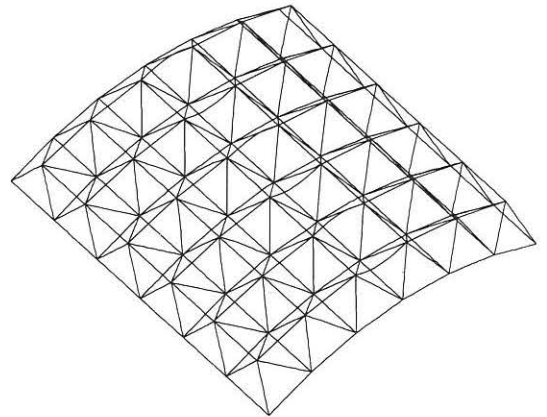


Fig.14 Buckling mode of hybrid structure

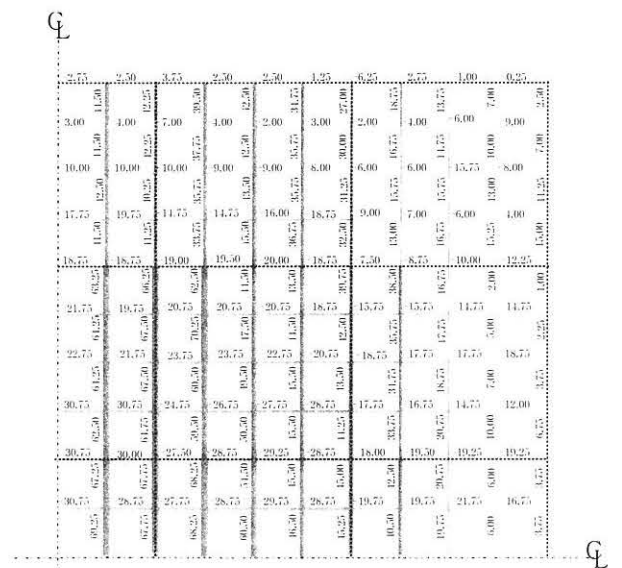


Fig.15 Tensile stress reduction of mambrane

座屈時の膜材の経糸方向と緯糸方向の応力分布をFig.15に示す。Fig.15で初期張力からの減少率を線の太さで示し、その減少率(%)を値で示す。また点線はフレーム材を示す。膜材の応力分布の様子は初期張力導入時と同様引張り力が分布していることに変わらない。しかし荷重をかけていくと初期張力が徐々に抜けていき、座屈時には境界部のユニットの残留張力と中央部のユニットの残留張力を比較すると、中央部に進むにつれ最大で約70%減少しているのが分かる。

5. 3 実験結果と解析結果での比較考察

膜材を取り付けることによって座屈モードが変化し、座屈荷重が増加した。そこで C_j (無次元化回転ばね定数)を個材の弱軸方向で与えた時の有効強度曲線⁷⁾(Fig.16)を第一象限のみで描き、実験値と解析結果をプロットする。ラチスフレームのみの場合は有効強度曲線よりわずかに高い値を取っているのにとどまっているが、ハイブリッド構造のほうは実験結果、解析結果とも高い値を示していることから、ラチスフレームの場合は、個材の弾性座屈で定まる有効強度で座屈耐力が定まるといえ、膜材によってその個材の座屈を拘束することによって座屈耐力が上がっていることがわかる。

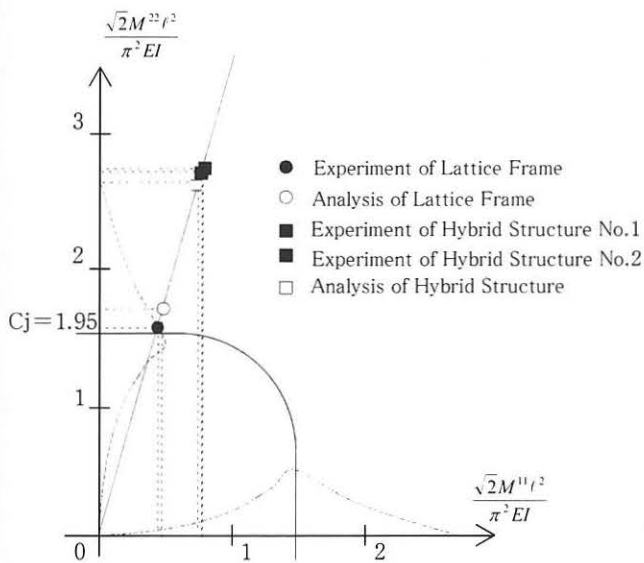


Fig.16 Effective strength curve

6. 結び

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、二層屋根型円筒ラチスシェルをモデルに用いて、座屈実験を行い、膜材料の座屈挙動に及ぼす効果を確認した。また、膜材料を直交異方性トラスに線材置換したモデルを用いて弾性座屈解析を行い、実験結果と比較考察した。その結果、本試験体においては膜材料を取り付けることによって、座屈モードが平面内の座屈モードから鉛直方向への座屈モードに変化し、座屈荷重を上昇させることが可能であることを示した。

今後の課題としては、膜材のユニットごとの再緊張の問題や線状に接合する方法、またよりデザイン的にも美しく、経済的かつ施工時の簡便さを備えた接合部のディティールの考案が必要であると考えられる。

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。また膜材料試験は太陽工業株式会社空間構造技術研究所の瀬川信哉博士に御協力いただきました。厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) 建築雑誌、「特集ハイブリッド構造のひらく未来」、Vol.107、No.1329、1992
- 2) H.L.ZHAO,X.M.CAO,M.Q.QIAM,Q.YANG,J.MC.Q.ZHAO : 「Theoretical analysis of the sheet space structure system and engineering practice」,Space structure4,Thomas,Telford, London,1993
- 3) 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号、1999.5
- 4) 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挙動について」、膜構造研究論文集2000、No.14、pp.33-41
- 5) Y.Taniguchi and T.Saka:「Buckling Behavior of Double-Layer Latticed Cylindrical Roof」,Proc.of the IASS International Symposium,Singapore,pp815-821,1997
- 6) 日置 興一郎 : 「異方性合平板の応力解析理論とその応用(その2: 応用)」,日本建築学会論文報告集、第138号、PP.7-13、昭和42年8月
- 7) 坂 壽二、日置 興一郎、阿部 真也 : 「個材の弾性座屈で決まる直交二方向二層立体トラス平板の有効強度の検討」、日本建築学会近畿支部研究報告集、昭和58年6月

Experimental Study on Buckling of Hybrid Structure with Membrane and Double-Layer Cylindrical Lattice Shell Roof

SYNOPSIS

Designers and engineers may always looking for a new structural system.As a new structural system,a hybrid structure may be effective.Then,in the paper ,a hybrid structure consisting of membrane and a double layer cylindrical lattice shell roof is treated to investigate the effect of membrane on the buckling load and buckling mode, experimentally and theoretically. As a result, it has been made clear that membrane increases the buckling load and changes the buckling mode from in-plate to out-of-plate deformation.

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

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

*3 Dept.of.Urban.Engineering,Graduate Student,Osaka City Univ.