

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 24 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560570

研究課題名（和文）テンション材と小径木丸棒で構成されたハイブリッド格子シェルの構造設計法の提案

研究課題名（英文）Structural Design Method of Hybrids Grid Shells Composed of Tension Members and Small Round Timbers

研究代表者

藤本 益美 (FUJIMOTO MASUMI)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50117983

研究成果の概要（和文）：テンション材と小径木丸棒からなる単層 2 方向格子シェルに関して、実験的研究により、初期軸力、荷重作用位置、テンション材の 3 次元配置、境界の支持条件が荷重変形形状に及ぼす効果ならびに離散的数値解析法の適用性を確認し、テンション材の材長管理により初期軸力が推定可能なことを明らかにした。さらに、実験的研究、数値解析的研究より、初期軸力、形状初期不整等を考慮した構造設計法提案の基礎資料を提示した。

研究成果の概要（英文）：For single layer two-way grids shell composed of round timber and tension member, the experimental studies show the ability of prediction of initial axial forces by the management of member length. From the experimental and numerical studies, the effects of tension member, those of geometrical initial imperfection, etc. information are shown to propose the structural design method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築構造・材料

キーワード：構造設計法，ハイブリッド格子シェル，小径木丸棒，テンション材，構造設計法，座屈荷重

1. 研究開始当初の背景

(1) 2 方向格子シェルにケーブル，鋼棒などのテンション材を組み合わせて軽量化し，座屈耐力を高め，意匠的にも構造的にも優れた新しい構造システムの提案が行われている。そのなかで，集成材などの木質系材料や鋼部材を格子材に適用した例は多いが，小径木丸棒を適用した例は先端的项目を除くと少なく，小径木丸棒とテンション材からなるハイブリッド格子シェルの実用化に関する

研究は，数少ないのが実状である。

(2) 本研究の様に，小径木丸棒を格子シェルやテンセグリティで構成されたハイブリッド格子シェルに適用する構造設計法に関する研究は，国内外から注目されている。テンセグリティ研究の第一人者である仏モンペレー大学のモトロ教授も 2008 年 10 月の IASS Symposium 2008 において，発表論文に対し，興味を示している。

2. 研究の目的

本研究では、テンション材を格子対角に配置し、格子部材に小径木丸棒を用いた単層2方向格子シェルのような、ハイブリッド格子シェルを対象とする。種々形状のハイブリッド格子シェルに対し、テンション材の効果に着目し、その荷重変形状を、実験的、解析的に明らかにし、ハイブリッド格子シェルの構造特性の基礎資料を得るとともに構造設計法の提案を目的とするものである。

3. 研究の方法

(1) テンション材が3次元的に配置され、小径木丸棒からなる単層屋根型円筒2方向格子シェルの座屈性状に関する実験的研究

テンション材が面外、面内に配置された単層屋根型円筒2方向格子シェルの座屈性状に関して、テンション材による初期軸力、荷重の作用位置を変数として鉛直荷重載荷実験を行い、その座屈性状を明らかにする。

(2) 曲面内にテンション材が配置された単層2方向格子ドームの座屈に関する実験的研究

- ① 投影水平平面が正方形であり、円弧で構成される推動曲面ドームについて、導入初期軸力と座屈性状に及ぼすテンション材の初期軸力の効果とを実験的に確認する。
- ② 中央子午線部材半開角が互いに等しい球面ドームに対し、導入初期軸力、座屈性状に及ぼす初期軸力と作用荷重の効果をj確認する。

(3) テンション材で補剛された小径木丸棒からなる単層2方向格子シェルの座屈荷重に関する数値解析的研究

テンション材と小径木丸棒部材からなる単層2方向格子シェルに雪荷重が作用する場合に初期軸力、荷重分布形、アーチ半開角等を変数とし、座屈荷重を数値解析的に検討する。

4. 研究成果

研究成果を3. で分類した3項目に整理して述べる。

(1) ① 実験計画

テンション材が3次元的に配置された単層屋根型円筒2方向格子シェルの外観と平面図を図1に示す。アーチ半開角は 45° 、アーチの曲率半径は2.83mである。試験体の支持条件は桁行方向支持点剛接支持、妻面アーチ節点水平ローラー支持である。試験体は荷重位置と導入された初期軸力により、CY-W-Sym-T12, CY-W-Asym-T10, CY-W-Sym-T0と呼ばれる3体である。記号Symは中央載荷(節点番号13), Asymは偏心載荷(節点番号12)を意味し、4. (2) ①も同じである。末尾のTに続く数値は導入された初期軸力を表している。

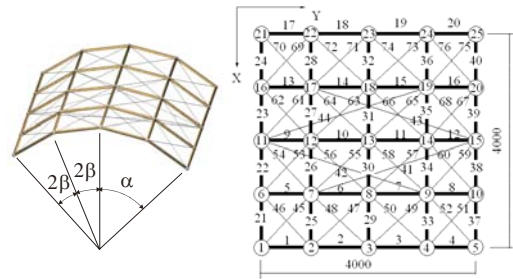


図1 外観と平面図

図2に格子部材として用いる小径木丸棒部材を、図3にテンション材として用いるPC鋼棒部材を示す。図4に示す長尺PC鋼棒部材は面外に配置する。PC鋼棒部材、長尺PC鋼棒部材は、部材製作長さを公称節点間距離より短く製作され、試験体組立て時に格子対角ならびに3次元的に配置される。PC鋼棒部材、長尺PC鋼棒部材の縮付けにより初期軸力が小径木丸棒部材とPC鋼棒部材に導入される。

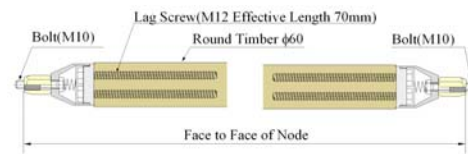


図2 小径木丸棒部材

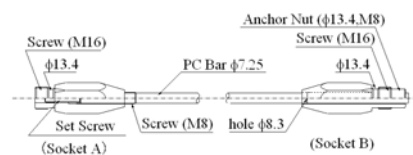


図3 PC鋼棒部材

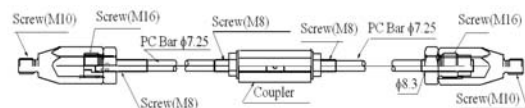


図4 長尺PC鋼棒部材

載荷荷重は中央載荷と偏心載荷の2種類であり、図5に偏心載荷システムを示す。

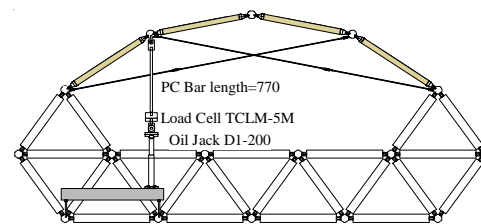


図5 偏心載荷システム

(1) ② 部材製作長さと公称部材長さとの差と初期軸力の関係

導入された初期軸力を表1に、公称部材長さと部材製作長さとの差を表2に示す。これらの数値は歪測定部材の測定長さを用いた。表1, 2に示すように導入初期軸力は、小径木丸棒の縮みにも関わらず、巨視的に見て部材長さの差に対応している。

表 1 導入初期軸力

導入軸力(kN)		小径木丸棒 PC 鋼棒部材				
		内部	外周	長尺	内部	外部
CY-W-Sym-T12	Ave.	-14.2	-3.74	2.85	12.0	12.2
	SD.	3.63	2.30	0.613	1.61	3.71
CY-W-Asym-T10	Ave.	-11.8	-1.51	2.89	9.89	10.2
	SD.	4.01	3.20	1.09	1.06	3.61

表 2 公称部材長さ と 製作部材長さ の 差

差(mm)		小径木丸棒 PC 鋼棒部材				
		内部	外周	長尺	外周	内部
CY-W-Sym-T12	Ave.	-0.22	-0.62	2.42	1.73	2.11
	SD.	0.18	0.18	0.15	0.14	0.24
CY-W-Asym-T10	Ave.	-0.19	-0.62	2.42	1.67	2.10
	SD.	0.21	0.18	0.15	0.08	0.24

(1)③ 荷重載荷実験

CY-W-Sym-T12 の荷重と中央アーチ節点変位の関係を図 6 に示す。図中に示す▽の位置は載荷点に繋がるテンション部材の初期軸力がゼロとなったことを表している。テンション材の初期軸力がゼロになると釣合い経路の剛性が低下することを確認した。

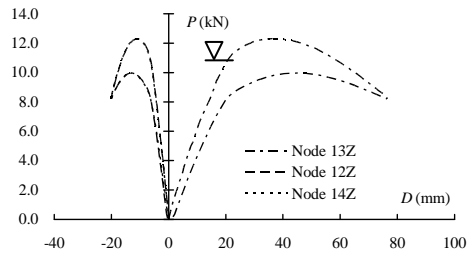


図 6 荷重と中央アーチ節点変位の関係 (中央載荷 CY-W-Sym-T12)

図 7 には偏心載荷時の荷重と中央アーチ節点変位の関係を示す。中央節点が上向きに変位している。最大変位に到達した後に載荷点と支持点をつなぐアーチ方向部材に曲げ座屈が発生し急激に荷重が低下した。

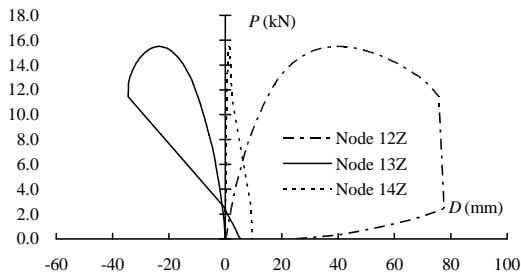


図 7 荷重と中央アーチ節点変位の関係 (偏心載荷 CY-W-Asym-T10)

図 8 には荷重と構面外に配置した長尺 PC 鋼棒部材の歪との関係を示す。中央載荷時には 4 本の長尺 PC 鋼棒部材がテンション材として載荷過程を通して機能する。一方、偏心載荷時には、2 本の長尺 PC 鋼棒部材は載荷過程を通して機能するが中央載荷時に比べてその効果低くなることを明らかにした。

初期軸力が存在する CY-W-Sym-T12 の座屈荷重は、存在しない CY-W-Sym-T0 に比べて 1.7 倍を示し(表 3 参照)、テンション材の初期軸

力によって座屈荷重が増加することを実験的に確認した。また、ここで用いた支持条件の場合に偏心載荷の座屈荷重が中央載荷に比べて 25%増加することを明らかにした。

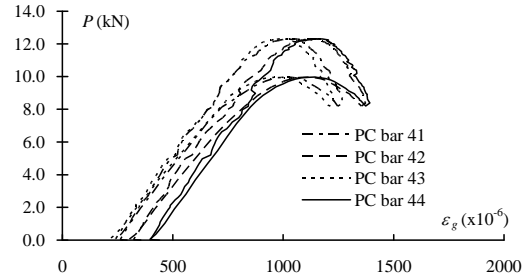


図 8 荷重と構面外に配置した長尺 PC 鋼棒部材の歪の関係 (CY-W-Sym-T12)

写真 1 には最大変位時の各試験体の変形モードを示す。CY-W-Sym-T12 では載荷点の節点座屈に対応する変形を示し、CY-W-Asym-T10 では載荷点の変形モードが先行しその後個材座屈が発生した。変位の増大によって座屈モードが変化することを実験的に確認した。



CY-W-Sym-T12 CY-W-Asym-T10
写真 1 最大変位時の変形モード

中央載荷時、偏心載荷時の中央アーチ節点の荷重変位関係に関する解析結果と実験結果の比較を行った。解析法は、実験から得られた釣合い経路を、締付けトルクにばらつきが予想された CY-W-Sym-T12 を除いて、載荷開始から座屈後領域を含めて評価できることを確認した。試験体組立て時の締付けトルク制御の重要性を明らかにした。

表 3 に、載荷実験と数値解析法から得られた座屈荷重を示す。解析結果が 8%~25%程低い値を示している。数値解析法は、実験から得られた座屈荷重、座屈モードを有意な精度評価できることを確認した。

表 3 座屈荷重の比較 (kN)

	Exp.	Ana.
CY-W-Sym-T12	12.3	9.15
CY-W-Asym-T10	15.5	14.0
CY-W-Sym-T0	6.96	6.37

図 9 には CY-W-Sym-T12 の中央アーチ節点の荷重変位関係に及ぼす長尺 PC 鋼棒部材の効果を数値解析結果から示している。長尺 PC 鋼棒部材を配置した場合は配置していない場合に比べて座屈荷重と剛性が 3 割程度増加している。偏心載荷の場合には長尺 PC 鋼棒部材が荷重変位関係に及ぼす効果はあまり現れなかった。構面外のテンション材配置には荷重

条件に対する詳細な検討が必要である。

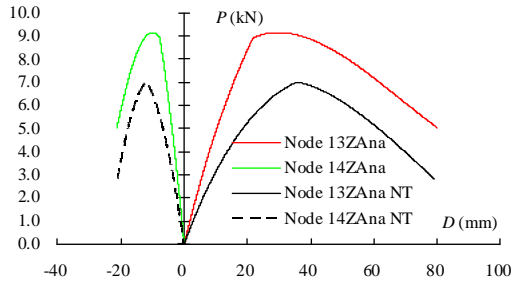


図9 長尺PC鋼棒部材の荷重変位関係に及ぼす効果

(2)① 実験計画

試験体はテンション材(PC 鋼棒部材)で補剛された単層2方向格子ドームであり、初期軸力導入実験、鉛直荷重載荷実験を行った。ドームの曲面形状は推動ドームと球面ドームの2種類である。推動ドームは母線、推動曲線が半開角 35° の円弧であり、スパン4m、各節点水平座標はX方向Y方向ともに1m間隔である。球面ドームは中央子午線アーチ半開角 30° 、中央子午線アーチ部材半開角 7.5° である。試験体名称は、推動ドームがD-T-W-Sym-T12, D-T-W-Sym-T0の2体, 球面ドームがD-S-W-Sym-T12, D-S-W-Sym-T0, D-S-W-Asym-T12, D-S-W-Asym-T0の4体である。記号D, T, S, Wは、それぞれドーム, 推動, 球面, 木を意味し、末尾のT12はPC鋼棒部材の設定初期軸力を表している。テンション材と小径木丸棒で構成された単層推動2方向格子ドームの平面図と立面図を図10に、単層球面2方向格子ドームの平面図と立面図を図11に示す。

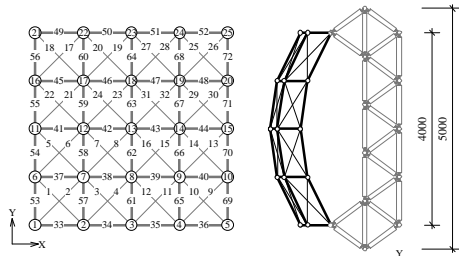


図10 単層推動2方向格子ドーム

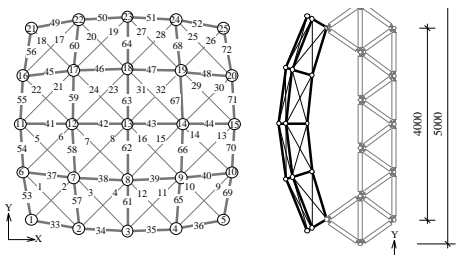


図11 単層球面2方向格子ドーム

試験体の支持条件は4隅点を支持台に剛接支持である。試験体を構成するテンション部材, 小径木丸棒部材は, 4. (1)に示した図2, 図3と同じシステムである。載荷装置は, 図5に示す構成と同じである。図12に測定項目

と測定部位の例を示している。

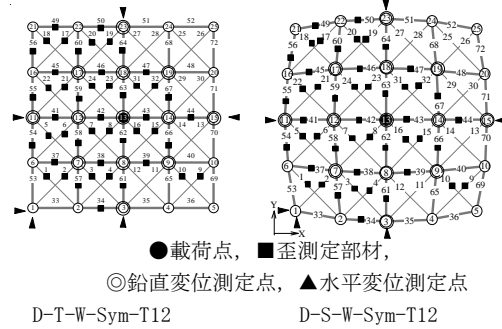


図12 歪測定部材, 変位測定点と荷重測定点

(2)② 部材製作長さとの初期軸力導入

テンション材として用いるPC鋼棒部材の初期軸力設定値と導入初期軸力の関係を論じる。まずPC鋼棒部材の初期軸力の設定値を12kNとしてPC鋼棒部材を製作した。PC鋼棒部材(PC-), 小径木丸棒部材(W-)の部材種別を図13に示す。

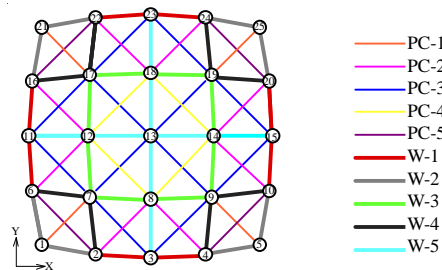


図13 球面ドーム試験体の部材種別

表4には、PC鋼棒部材種別ごとに設計上のノード面間距離、 l_0 、初期軸力の設定値に対する部材製作長さ、 l 、歪測定部材を対象とした製作後部材長さの平均値、 l_r を示す。同表中、 n は部材種別ごとの歪測定本数、 δl_r は、公称部材設定長さに対するずれ値であり、正は製作後部材長さが公称設定部材長さより長いことを示す。 δl_w は丸棒部材の製作長さ誤差とPC鋼棒製作長さ誤差を考慮した長さ補正值であり、部材種別の平均で定める。正の δl_w はPC鋼棒部材の伸び量の増加を意味する。 l_g は丸棒部材の誤差とPC鋼棒部材の製作長さ誤差を考慮したPC鋼棒部材の推定製作長さを表す。

表4 球面ドーム部材の製作長さ(mm)

種別	n	l_0	l	l_r	δl_r	δl_w	l_g
PC-1	3	1354.03	1352.07	1351.57	0.50	-0.09	1352.16
PC-2	4	1455.21	1453.11	1452.97	0.14	-0.09	1453.20
PC-3	8	1529.05	1526.84	1526.61	0.17	-0.09	1526.93
PC-4	4	1554.92	1552.67	1552.62	0.05	-0.09	1552.76
PC-5	3	1568.79	1566.53	1566.33	0.20	-0.09	1566.61

表5には導入初期軸力の測定値 N_i^M 、と小径木丸棒部材の縮みを考慮した導入初期軸力の上界推定値 N_i^U 、下界推定値 N_i^L を示す。上界推定値、下界推定値はそれぞれ、小径丸棒部材の最小部材長さ、最大部材長さを基本部材と

した場合に対応する。なお、*はPC鋼棒の上下界推定導入軸力から定めた値を表している。PC鋼棒部材の導入初期軸力の下界推定値に対する導入初期軸力の比 N_i^M / N_i^L は、推定ドームで1.11~1.25、球面ドームで0.75~1.16を示している。多少のばらつきはあるが、PC鋼棒部材、小径木丸棒部材長さを管理すれば初期軸力設定値から実際に導入される初期軸力を工学的に有意な精度で推定可能なことを明らかにした。これは、テンション材で補剛された小径木丸棒を用いた単層2方向格子シェル構造設計に有効な情報である。

表5 球面ドームの導入初期軸力と推定初期軸力(kN)

	n	N_i^M (標準偏差)	N_i^U	N_i^L	N_i^M / N_i^L
PC-1	3	8.30(1.39)	8.30	7.95	1.04
PC-2	4	7.71(0.80)	8.49	8.15	0.95
PC-3	8	7.35(1.10)	8.62	8.28	0.88
PC-4	4	6.28(1.43)	8.66	8.33	0.75
PC-5	3	9.71(1.46)	8.68	8.35	1.16
W-1	4	-5.82(1.14)	-5.94*	-----	-----
W-2	2	-6.65(0.65)	-----	-----	-----
W-3	8	-11.6(2.42)	-11.9*	-----	-----
W-4	4	-9.6(2.63)	-----	-----	-----
W-5	8	-9.86(2.31)	-----	-----	-----

(2)③ 荷重載荷実験

中央載荷実験(D-S-W-Sym-T12)における子午線アーチ節点の荷重変位関係を図14に示す。中央載荷実験の場合には、テンション材の初期軸力の効果によって釣合い経路の勾配、座屈荷重が増加することを確認した。座屈モードは、推定ドームの場合に初期軸力が減少すれば個材座屈から節点座屈(ラグスクリー一部分)に変化した。球面ドームの場合には、初期軸力変化にも関わらず個材座屈が現れた。

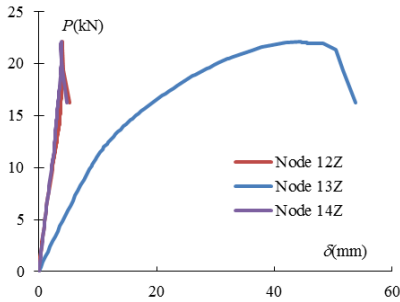


図14 球面ドーム子午線アーチ節点の荷重変位関係(D-S-W-Sym-T12)

図15に偏心載荷時の球面ドーム子午線アーチ節点の荷重変位関係を示す。偏心載荷の場合には、初期軸力の増加により、釣合い径路の剛性が増加するが、実験で想定した最大変位時の荷重に差がないことを明らかにした。

表6に実験と解析から得られた座屈荷重、最大荷重を示す。同表中*は実験最大変位に対応する解析上の荷重変位関係から定まる荷重を表し、 N_i^A は解析における初期軸力設定値であ

る。数値解析法は、座屈荷重、最大荷重共に実験結果を工学に有意な精度で評価できること、釣合い経路、座屈モードについても実験結果を評価可能なことを確認した。

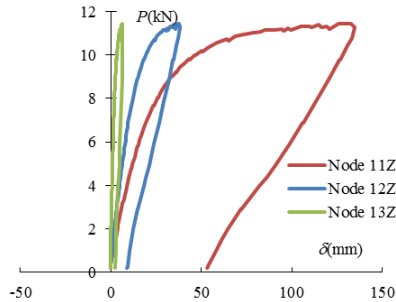


図15 球面ドーム子午線アーチ節点の荷重変位関係(D-S-W-Asym-T12)



写真2 座屈荷重時の変形(初期軸力12kN)

表6 座屈荷重、最大荷重(kN)

	Exp.	N_i^A	Ana.
D-T-W-Sym-T12	32.1	12	29.8
D-T-W-Sym-T0	23.9	1.0	25.8
D-S-W-Sym-T12	22.1	12	25.0
D-S-W-Sym-T0	18.5	1.0	21.6
D-S-W-Asym-T12	11.4*	12	14.0*
D-S-W-Asym-T0	11.0*	1.0	14.0*

(3)① テンション材を格子対角に組み込んだ小径木丸棒を用いた単層屋根型円筒2方向格子シェルを対象とし、離散的取扱法による解析結果から、座屈荷重と形状初期不整、初期軸力、アーチ半開角の関係を示し、本解析例から得られた座屈荷重低減係数の性状を論じた。形状初期不整は、Formianに新しい関数を導入し与えている。

図16には荷重分布形を変数として表した形状初期不整のない系(完全系)の座屈荷重と初期軸力の関係を示している。座屈荷重は、初期軸力がゼロから効果が最大となる初期軸力(最適初期軸力)まで増大し、初期軸力が最適初期軸力より大きくなると緩やかに減少することを確認した。

完全系、形状初期不整が存在する系(不完全系)ともに作用荷重の分布形が非対称になるほど、最適初期軸力の値は増加するが座屈荷重は低下することを明らかにした。さらに、半開角が30°から45°に増加すると、座屈荷重の増加率が最大となる最適初期軸力が増加することを明らかにした。

図17には座屈荷重低減係数と初期軸力の関係を示している。ここで座屈荷重低減係数とは、完全系の座屈荷重に対する不完全系の座屈荷重の比を表している。不整による座屈

荷重低減係数は、アーチ半開角が 30° の場合、荷重分布形が全載に近ければ 0.82, 荷重分布が全載と半載の中間にあたる $\beta=0.8$ であれば、0.9, 半載の場合にはほぼ 1 となっている。形状、境界条件が同じであれば、導入された初期軸力による座屈荷重低減係数の変化はわずかであることを明らかにした。

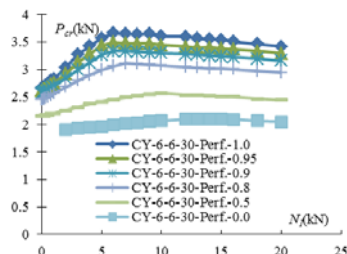


図 16 完全系の座屈荷重と初期軸力の関係

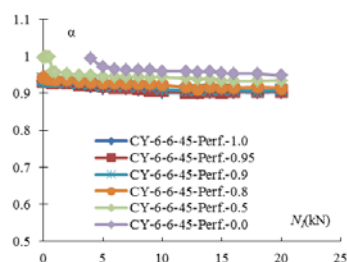


図 17 座屈荷重低減係数と初期軸力の関係

(3)② テンション材を格子対角に組み込んだ小径木丸棒を用いた単層球面 2 方向格子シェルを対象とし、初期軸力をパラメータとして離散的取扱法による座屈荷重解析結果から、座屈荷重と初期軸力、形状初期不整、アーチ半開角の関係を検討した。形状初期不整の生成には Formian を用いている。

図 18 に構造ユニット数と初期不整の有無を変数とし座屈荷重と初期軸力の関係を示す。

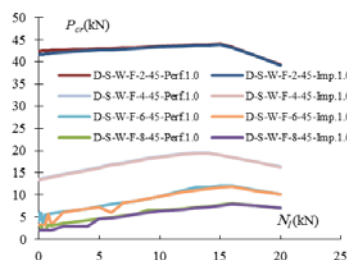


図 18 座屈荷重と初期軸力の関係

非線形解析結果から、テンション材の初期軸力の増加による座屈荷重の増加を確認した。さらに、今回採用した形状初期不整分布では、形状初期不整の効果による座屈荷重の低下がほとんど現れないこと、また、構造単位数が小さい場合を除くと、ピン支持と固定支持で境界条件の差異が座屈荷重に影響しない場合があることを明らかにした。

以上の(1)～(3)までに述べた研究成果より、テンション材と小径木丸棒からなる単層 2 方向格子シェルに関する実験的研究では、テン

ション材の 3 次元配置の可能性と初期軸力推定法を示した。この方法は既存のラチスシェルの構造設計法に容易に組み込めると予想される。テンション材が配置された 2 方向格子シェルの解析的研究では、座屈荷重に及ぼす初期軸力、形状初期不整の効果について新たな知見を明らかにした。

よって、当初の研究目的はほぼ 8 割方達成できたと考えられる。

今後は、種々形状のハイブリッド格子シェルに対し、テンション材の効果に着目し、実験的、解析的研究から、ハイブリッド格子シェルの構造特性の基礎資料の蓄積を図るとともに、包括的なラチスシェルの構造設計法を提案する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

①張 中昊, 藤本益美, 瀧野敦夫, 今井克彦: テンション材が 3 次元的に配置された小径木丸棒を用いた単層屋根型円筒 2 方向格子シェルの座屈性状に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 78 巻, 第 686 号, pp. 781-789, 2013 年 4 月, 査読有

〔学会発表〕(計 2 件)

①Masumi FUJIMOTO, Atsuo TAKINO, Zhonghao Zhang, Katsuhiko IMAI: Study of Single Layer Two-way Grid Shell with Tension Member, Proceedings of IABSE-IASS Symposium 2011, London, Sept. 20-23, Paper No. 254, 2011.9, London, UK., 査読有

②張 中昊, 藤本益美, 瀧野敦夫, 今井克彦: テンション材が 3 次元的に配置された小径木丸棒単層屋根型円筒 2 方向格子シェルの座屈性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造 I, pp. 653-654, 2011 年 8 月 23 日, 早稲田大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 益美 (FUJIMOTO MASUMI)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 50117983

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

瀧野 敦夫 (TAKINO ATSUO)

奈良女子大学・生活環境学部・講師

研究者番号: 10403148