ボール接合単層ラチスドームの座屈実験及び弾塑性座屈解析

中央集中荷重を受ける部分球形ドームについて

EXPERIMENT AND ELASTO-PLASTIC BUCKLING ANALYSIS
OF BALL-JOINTED SINGLE LAYER RETICULATED DOMES

Partial spherical domes under concentrated load

鈴木 敏郎*, 小河 利行**, 久保寺 勲***, 五十嵐規矩夫****

Toshiro SUZUKI, Toshiyuki OGAWA, Isao KUBODERA and Kikuo IKARASHI

The purpose of this paper is to examine the elasto-plastic buckling behavior of a single layer reticulated dome subjected to a static load at the center of the dome. The nonlinear analytical and the experimental study of a shallow dome were carried out. The type of buckling concerned here is the snap-through of the dome. The results of the experimental study were compared with the numerical analysis. It is emphasized that the joint characteristics as well as the material non-linearity have significant effects upon the buckling behavior of a dome.

Keywords : single layer, reticulated dome, bolted joint, model experiment, elasto-plastic analysis

単層, ラチスドーム, ねじ込み接合, モデル実験, 弾塑性解析

§1. 序

単層ラチスドームの座屈挙動には, 幾何形状, 格子構成, 接合形式, 材料強度などの機械的性質など多くの因子が関与しているため, 座屈耐力に限っても, 柱の座屈曲線のように一般化された評価式にまとめられるまでには至っていない。しかし, この間, 有効剛性を用いてラチスドームを連続体置換することにより, 座屈耐力は, 連続体シェル of 古典座屈荷重式さらには座屈前変形を考慮した座屈耐力評価法で検討されている。この座屈耐力評価法を基本として, 座屈形式を分類することで, 弾性座屈に関しては, 共通のパラメータで整理されるようになっている。この基本パラメータによる座屈耐力の評価法は, 幾何学的な非線形性を考慮した数値解析例, 実験によって, より精密に検討されている^{6)~10)}。

さらに設計に関与する現実的な要因として, 形状及び荷重分布の不整に関する研究^{11)~13)}, 剛接合とピン接合の中間的な性質を有する接合部を対象とした研究^{14)~18)}, 及び鋼構造部材で構成されたドームを対象とした座屈実験, 材料の非線形性を考慮した弾塑性座屈解析^{4), 5), 19), 20)}

が精力的に進められている。その結果, 弾塑性座屈に関しても, IASS の recommendation で用いられている Dunkerley 式の適用あるいは柱要素の圧縮強度と類似な評価方法でドームの座屈荷重を推定する方法も検討されている^{16), 21)}。

これらの単層ラチスドームの弾塑性座屈耐力評価法を更に確かなものにし, その適用範囲を広げるうえで, より現実的な単層ラチスドームを対象とした弾塑性座屈解析を充実させる必要がある。このため, 様々な要因を含んだ単層ラチスドームの座屈挙動を認識する必要があり, 実際のラチスドームに近いモデルを用いた座屈実験より得られる知見が重要となる。事実, 実際に建設されることの多いボール接合単層ラチスドームの座屈実験⁴⁾を行うと剛接合の場合の解析結果⁵⁾と比べて座屈耐力が低い等の違いがみられる。この違いは, ボール接合としたときの接合部の影響であり, 実際の単層ラチスドームの座屈挙動を追跡する場合には, これら接合部等を考慮した解析及び実験データの検討が必要である。

先に簡単に述べたが, 接合部を考慮した立体トラスあ

本論文の一部は参考文献1)~3)において発表した。

* 東京工業大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

** 東京工業大学工学部建築学科 助教授・博士(工学)

*** 株式会社巴コーポレーション・博士(工学)

**** 東京工業大学工学部建築学科 助手

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

TOMOE CORPORATION, Dr. Eng.

Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology

るいはラチスドームの研究の主なものとしては、剛域率及び回転ばねの影響に言及している研究²²⁾、接合部回転剛性の影響についての研究¹⁵⁾、半剛接合的であるねじ込み式の接合部で構成される単層ラチスドームの耐力力を検討した研究¹⁹⁾、及び軸方向の緩みについての研究^{17), 18)}等があげられる。これら接合部の影響を考慮した研究は、実際のラチスドームの座屈挙動を把握するうえで重要な指標となる。

このような観点から本研究の目的は、ボール接合された単層ラチスドームの挙動を実験により明らかにするとともに、この実験データを基に、このようなねじ込み式の接合部を有するラチスドームの座屈挙動を追跡する

弾塑性解析法を確立し、その座屈性状を分析することにある。本論文では第一に、ねじ込み接合で組み立てた単層ラチスドーム模型を製作し^{19), 22)}、中央集中荷形式による座屈実験を行い、その座屈挙動を調べた。次に、剛域長を含む接合部特性を考慮した弾塑性解析法を提案し、ボール接合単層ラチスドームの弾塑性解析結果と実験結果との比較検討を行った。さらに実験モデルと同一形状の単層ラチスドームを対象とした弾塑性座屈解析を行い、その座屈及び座屈後挙動に關与する接合部特性の影響を個々に分析した。

§2. 単層ラチスドームの座屈実験

2.1 実験概要

実験モデルは、正六角形平面を有し、ドーム頂上につながる部材の傾斜角 $\theta=3^\circ$ である部分球形ラチスドームである。部材は、直径 $\phi=24$ mm の丸鋼を使用し、頂点を含む大円面内の部材以外は、1/2 部材を等断面積のカプラーでねじ込み結合し、1 部材とした。接合部は外径 100 mm、内径 54 mm の中空ボールジョイントを使用

Fig. 1 Completed dome (Model 1)

Fig. 2 Experimental set-up

Fig. 3 Loading set-up

Fig. 4 Member arrangement and measured points

Table 1 Mechanical properties and geometry of a dome

		Model 1	Model 2
Young's modulus	E (t/cm ²)	2135.1	2135.1
Modulus of strain hardening	E_t (t/cm ²)	135.3	135.3
Yield stress	σ_y (t/cm ²)	4.75	4.75
Member length	l (cm)	35.6	50.6
Sectional Area	A (cm ²)	4.52	4.52
Geometrical moment of inertia	I (cm ⁴)	1.63	1.63
Slenderness ratio	λ	59	84
Member's inclination	θ (deg)	3.0	3.0
Dome radius	R (cm)	340.1	483.4
Rise of a central unit dome	h (cm)	1.86	2.65
Span	L (cm)	141.4	201.0
Rise of dome	H (cm)	7.432	10.56
Rise span ratio	H/L	0.0526	0.0526

し、部材と直接ねじ込み接合とした。ねじ部はすべてM24×3の一級ねじである。組み上ったドーム模型をFig.1に示す。周辺部は、ボールサポートにより鉛直方向の変位を拘束、回転は自由とし、サポート台の底面にテフロン板を溶接することで、水平放射方向にピン・ローラー支持とした。実験装置の概要をFig.2に、加力部断面の詳細をFig.3に示す。載荷方法は、中央節点集中載荷形式とし、反力ビームを貫通した加力用の鋼棒の下部ナットを締めつけることで中央点の鉛直変位を制御して加力した。加力用ナット及び加力ボール内の反力用ナットの内側には球面ブッシュ受けを配して加力用鋼棒に曲げが加わらないようにし、この鋼棒をロードセルとした。加力部のボールジョイントは球面ブッシュ受けを収めるため、外径120 mm、内径69 mmの中空ボールを用いている。加力用鋼棒下部に溶接された板は、この鋼棒の回転を拘束する目的で取り付けたものである。変位及びひずみの測定位置をFig.4に示す。ひずみゲージは丸鋼の上下に2枚貼付した。貼付位置は、部材の中央及び接合ボール端面から20 mmの位置（ボール中心から66 mm、ただし頂部においては76.5 mm）である。実験は、ボール中心間距離での部材代表長さ $l=35.6$ cm、細長比 $\lambda=59$ の Model 1 と、部材代表長さ $l=50.6$ cm、細長比 $\lambda=84$ の Model 2 に対して行った。Model 1, Model 2 のスパン L 、ライズ H はそれぞれ141.4 cm、7.43 cm 及び 201.0 cm、10.56 cm であり、ライズスパン比 H/L は約 $1/20$ となる浅いドームとなる。試験体に用いた丸鋼の機械的性質及び試験体の形状諸元をTable 1に示す。試験体の形状初期不整の最大値は Model 1 で点 R における $+0.33$ cm、Model 2 で点 O における $+0.23$ cm（上向き鉛直方向初期たわみ）であり、各々、ドームのライズ H の 4.44 %、2.18 % であった。

2.2 実験結果及び考察

両モデルの中央点の荷重変位図をFig.5に示す。縦軸の荷重値は $3EA(\sin \theta)^3$ で、横軸の変位量は中央単位パネルのライズ h で無次元化している¹⁴⁾。ただし中央単位パネルとは、Fig.4に示すように、中央点Sを含む点M, N, O, P, Q, Rで囲まれた六角形パネルのことである。

中央点の荷重変位曲線が最大勾配に至るまでの両モデルは同様の傾向を示し、部材の降伏が先行する。見かけの細長比 $\lambda=84$ の部材で構成された Model 2 は中央単位パネルの圧縮部材の降伏が始まると、耐力の上昇は小さくなり、変位が大きく進み、再び大きな耐力の上昇はみられない。これに対し細長比 $\lambda=59$ の部材で構成された Model 1 は中央単位パネルの圧縮部材の降伏後も耐力は上昇し、緩やかなスナップスルー性状を呈した。これらの相異は Model 1 では中央パネルの局所変形が

Fig. 5 Load-displacement curves

Fig. 6 Load-axial force relations

Fig. 7 Load-axial force relations

進行したのに対し、Model 2 では中央隣接点 (Fig.4中の点M, N, O, P, Q, R) の変位も進行する全体座屈の性状であることに起因している。文献5)で行ったボールジョイント部を有さない剛接合単層ラチスドームの弾塑性座屈解析結果と比較しても、耐力、初期剛性ともに小さく、接合部剛性が座屈挙動に大きな影響を与えている。

Fig.6, Fig.7に中央単位パネルの放射方向及び周方向の部材の荷重-軸力関係を示す。図中の N_y は部材断面の降伏軸力である。中央単位パネルの放射方向部材の圧縮軸力は荷重の増加にほぼ比例して増大し、Model 1では降伏軸力の約25%、Model 2で約20%の値で急激に反転して減少する。周方向部材は初期、引張材とな

Fig. 8 Axial force-moment relations

Fig. 9 Final configuration (Model 1)

るものの、その値は比較的小さい。放射方向部材の軸力の反転に対応して、周方向部材も引張り状態から圧縮状態に移行する。Fig. 5 の荷重変位曲線と比較して、この時の荷重を中央単位パネルの座屈荷重と見なす。

Fig. 8 は、中央放射方向部材の中央節点近傍断面での軸力-曲げモーメント関係を示したものである。図中の破線は、次式で示される円形部材断面の降伏曲面を示している。

$$\left. \begin{aligned} N/N_y &= 1/\pi \cdot (\sin 2\alpha + 2\alpha) \\ M/M_p &= \cos^3 \alpha \quad (0 \leq \alpha \leq \pi/2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.1)$$

ここに、 N_y 、 M_p は各々、断面の降伏軸力、全塑性モーメントであり、 α は全断面が塑性化しているときの中立軸位置を示す角度パラメータである²⁴⁾。軸力図に対応して、座屈荷重点において断面内の応力状態は降伏曲面に

Fig. 10 Mechanical modeling of a member

達し、その後、軸力は低下する性状を示している。Fig. 9 に Model 1 の最終崩壊形を示す。

§3. 弾塑性解析による単層ラチスドームの座屈挙動の検討

3.1 解析上の仮定

本実験と文献5)で行ったボールジョイント部を有さない剛接合単層ラチスドームの弾塑性座屈解析の結果と比較すると、本実験結果は座屈荷重、初期剛性ともに小さく、接合部特性が座屈挙動に大きな影響を与えている。そこで、以下の仮定条件に基づきモデル化した接合部を有する部材要素を作成し、実験結果との比較検討を行う。

(1) 部材モデルはボールジョイント部を表す剛域、回転ばね、並進ばねからなる接合部および弾塑性梁要素で構成される (Fig. 10)。

(2) 接合部特性は剛域長、剛接度を表す3方向の弾性回転ばね剛性 $K_{\theta x}$, $K_{\theta y}$, $K_{\theta z}$ (t·cm/rad) と、ねじ部の軸方向の緩みを表す x 軸方向の弾性並進ばね剛性 K_x (t/cm) で表現する。なお、曲げモーメント作用下での緩みの影響は、 $K_{\theta y}$, $K_{\theta z}$ に含むものとする。

(3) 弾塑性梁要素の幾何学的非線形性は、軸方向ひずみ増分に対し、変位増分の一階微分の2次項まで含めることで表現する²³⁾。

(4) 弾塑性梁要素の x 軸方向変位増分 Δu は x の1次式、 y , z 軸方向変位増分 Δv , Δw は x の3次式、ねじれ角増分 $\Delta \phi$ は x の1次式で表される変位関数を用いる²³⁾。

(5) 梁の要素剛性を求める際の数値積分にはガウス積分法を使用し、円柱断面内では円周方向に15点、半径方向に5点、部材軸方向に5点の(15×5×5)のガウス積分点を設定する。また、応力-ひずみ関係も、これらの点で追跡する⁵⁾。

(6) 塑性化、弾性除荷は軸方向の直ひずみのみで判定し、応力-ひずみ関係は Fig. 11 に示す bi-linear 型を仮定する⁵⁾。

(7) サンプナンのねじれ剛性は要素内一定とし、弾性値を保つ。

Fig. 11 Stress-strain relation

3.2 解析モデル

剛域長, 3方向の回転ばね, 要素軸方向の緩みを考慮した接合部および弾塑性梁要素からなる部材モデルを用いて, 実験モデルを対象として接合部の剛性を考慮した弾塑性座屈解析を行い, 実験結果を検討する。解析モデルを Fig. 12 に示す。境界条件は, 周辺節点がピン・ローラー支持されているものとし, 対称性を仮定し, 全体の1/2を解析対象とした。材料定数は Table 1 の値を用いている。ただし, 部材を結合したカプラー部はモデル化してなく, 梁要素は連続しているものとした。

3.3 接合部の特性を考慮した単層ラチスドームの座屈挙動

実験に対し, 剛域長は接合部のボールの半径 (50 mm)

を仮定した。軸方向の緩みは, 軸方向並進ばね (K_x) によって表現しているが, ねじが緩んでいる状態でもある程度の接線剛性が存在するとして¹⁷⁾, $K_x=100 \text{ t/cm}$ を仮定した。これは, 梁部材の単位長さ当たりの伸び剛性 $EA \text{ (t/cm)}$ の約 1/100 に相当する。 l_s を緩み幅とし, この並進ばねは $\pm l_s$ の範囲でのみ作用するものとした。

文献 18) によれば, 本実験で対象としているような $\theta=3^\circ$ の単層ラチスドームの弾塑性座屈荷重は軸方向の緩みに影響を受けない。また, 文献 15) によれば, 接合部の回転ばね剛性の値により座屈荷重が大きく変化する領域が存在する。これら2つの知見を参考として, まず緩みは無いものとし, 接合部の回転ばね剛性をパラメータとしたときの荷重変位関係を Fig. 13, Fig. 14 に示す。

Fig. 12 Analytical model

Fig. 13 Load-displacement curves

Fig. 14 Load-displacement curves

ただし、ねじ込み接合であることを考慮して、ここでは $K_{\theta x}=0.0 \text{ t}\cdot\text{cm/rad}$ としている。座屈荷重に着目すると、回転ばね剛性の値により大きく変化するが、Model 1, Model 2 共に、回転ばね剛性 $K_{\theta y}=K_{\theta z}=200.0 \text{ t}\cdot\text{cm/rad}$ の解析結果が実験における値と良く対応している。この値は、Appendix に示すように、接合部を含む部材の曲げ実験より得られる接合部の回転ばね剛性の値にほぼ等しい。またこの結果は、単層ラチスドームの座屈挙動は、軸力 0 の場合の曲げ試験より得られる接合部の曲げ剛性を用いた解析により予測できるという文献 19) の知見に一致している。このばね剛性の値は、梁部材のみかけの剛度 EI/l との比を採り、(3.1) 式の無次元化回転ばね定数 $k_{\theta i}$ ($i=x, y, z$) で表すと、Model 1 で $k_{\theta y}=k_{\theta z}=2.05$, Model 2 で $k_{\theta y}=k_{\theta z}=2.91$ となる。

$$k_{\theta i}=K_{\theta i}\cdot l/EI \quad (i=x, y, z) \quad \cdots \cdots (3.1)$$

次に解析結果と実験結果の初期剛性の違いを説明するため、軸方向の緩みを仮定する。回転剛性を一定値 $K_{\theta y}=K_{\theta z}=200.0 \text{ t}\cdot\text{cm/rad}$ のまま、緩みの幅 l_s を 0.00, 0.015, 0.030 cm としたときの荷重変位関係を Fig. 15, Fig. 16 に示す。なお、この緩みの幅の選定にあたっては、文献 17), 18) を参考とした。緩みの幅 $l_s=0.015 \text{ cm}$ のとき、初期剛性、座屈荷重の値とも、解析結果は実験結果と良い対応を示している。緩みの幅 $l_s=0.015 \text{ cm}$ は接合部のねじピッチ $p=0.3 \text{ cm}$ の 1/20 に相当する。

中央単位パネル部材の荷重-軸力関係を Fig. 17 ~ Fig. 20 に示す。Fig. 17, Fig. 18 は中央単位パネルの放射状部材の軸力の推移を示したものである。この部材は圧縮軸力によって鉛直外力と釣合うが、座屈荷重点近傍

Fig. 15 Load-displacement curves

Fig. 16 Load-displacement curves

Fig. 17 Load-axial force relations

Fig. 18 Load-axial force relations

で最大圧縮軸力に達し、以降、引張りの方向に軸力が推移する。この荷重-軸力関係も解析結果と実験結果は $l_s = 0.015 \text{ cm}$ のとき、良い一致をみている。Fig. 19, Fig. 20 は中央単位パネルの周方向部材の軸力の推移を示している。周方向部材は最初、引張軸力が生じているが、中央パネルの反転に伴い、圧縮軸力を負担する。この傾向は解析によっても、とらえられているが、放射状部材に比較して、実験結果との対応は良好とは言えない。これは、実験モデルではこの部材はカプラーで中央を接続して構成されているため、カプラー部のねじの緩みの影響が一因と考えられる。

Fig. 21, Fig. 22 は中央放射方向部材の中央節点近傍断面での軸力-曲げモーメント関係を示したものである。なお解析は、 $K_{\theta y} = K_{\theta z} = 200.0 \text{ t}\cdot\text{cm}/\text{rad}$, $l_s = 0.015 \text{ cm}$ の場合である。Model 1, Model 2 ともに解析結果の方が軸力分担がやや大きめであるが、ほぼ実験結果をとらえている。また、両モデルともほとんど曲げ降伏により降伏曲面に達しており、中央集中荷重による曲げ作用の影響が強いことが分かる。この強い曲げ作用が、先の荷重変位関係で、回転ばね剛性により座屈荷重が大きく変化する要因の一つとなっている。

以上、本研究で対象とした単層ラチスドームでは、剛域はボールの半径を仮定し、部材断面主軸まわりの回転ばね剛性は、部材曲げ実験の初期剛性より得られる値を

解析に用いればよい。また、軸方向の緩みに関しては、座屈耐力には影響を及ぼさず、初期剛性に影響を及ぼし、緩みをねじピッチの $1/20$ と仮定したときに初期剛性が一致する。ただし、緩みの値に関しては既往の研究¹⁸⁾を参考に選定しており、実際の緩みの値を算定し解析に取り入れるまでには至っておらず、今後の更なる研究が必要である。

§4. 単層ラチスドームの弾塑性座屈及び座屈後大変形挙動に及ぼす各接合部特性の影響

4.1 解析概要

ここでは、接合部を考慮した弾塑性梁要素モデルを用いて、中央集中荷重を受ける単層ラチスドームの弾塑性座屈性状に与える接合部特性の影響を個々に検討する。検討する接合部特性は、剛域長、部材軸方向の緩み、3方向の回転ばねである。実験では、変形量を中央単位パネルのライズ程度にとどめたが、本章で行う解析では座屈後の最大耐力も考察し、大変形時の単層ラチスドームの性状も明らかにする。対象とするラチスドームは、実験を行った Model 1 とし、解析仮定、解析モデルは前章で用いたものと同一のものである。

4.2 大変形解析結果及び考察

(1) 剛域率の影響

ボール部分の半径である剛域長を $\lambda_1 l$ とし、 λ_1 を剛域

Fig. 19 Load-axial force relations

Fig. 20 Load-axial force relations

Fig. 21 Axial force-moment relations

Fig. 22 Axial force-moment relations

Fig. 23 Load-displacement curves

Fig. 24 Load-displacement curves

Fig. 25 Load-displacement curves

Fig. 26 Initial yield, buckling and maximum load

率と定義し、これを変化させたときの荷重変位関係を Fig. 23 に示す。緩みの幅はゼロ、回転ばね剛性を無限大とし、ボールと梁部材は剛接合されている。前章同様に荷重変位曲線の最初に現われる極値あるいは反曲点を座屈荷重、座屈後の大変形域に現われる極値を最大耐力と定義した。座屈荷重は Fig. 26(a) に示すように剛域率にほぼ比例して大きくなるが、スナップスルー挙動に大きな差異は見られない。この範囲では座屈荷重は初期降伏荷重の 1.4~1.8 倍程度となっている。最大耐力も剛域率に比例して大きくなっているが、その差は比較的小さい。

(2) 軸方向の緩みの影響

剛域率をゼロ、回転ばね剛性を無限大で剛接合とし、緩みの幅 l_s を変化させたときの荷重変位関係を Fig. 24 に、 l_s と初期降伏荷重、座屈荷重、最大耐力との関係を Fig. 26(b) に示す。軸方向の緩みの影響によってドームの初期剛性は小さくなり、変形の進む度合いが大きく、スナップスルー挙動も明確でなくなる。しかし、緩みを伴っても座屈荷重はほとんど変化せず、初期降伏荷重の

低下率も小さい。緩みの幅に伴ってスナップスルー挙動が緩やかになっていくことに起因して、最大耐力は低下していき最大耐力点も明確でなくなる。以上、本解析のモデル化の範囲では、接合部の緩みはドームの初期剛性に大きく関与するものの、座屈荷重に及ぼす影響は小さいものと判断される。これは、文献 18) で得られている知見と一致している。

(3) 回転ばねの影響

剛域率、緩みの幅をゼロとし、接合部の無次元化回転ばねを変化させたときの荷重変位関係を Fig. 25 に示す。剛接合のものと部材軸まわりの無次元化回転ばね定数 $k_{\theta z}$ のみゼロにしたものと比べると、中央単位パネルの座屈挙動に

大きな違いは見られず、ほぼ同じ荷重を示しているが、最大耐力には差が見られる。

これに対し、部材断面主軸回りの無次元化回転ばね定数 $k_{\theta y}$, $k_{\theta z}$ は、ドームの荷重変位関係に大きな影響を及ぼす。ここでは (3.1) 式で表される無次元化回転ばね定数を、 $k_{\theta y}$, $k_{\theta z}$ 共に、1.03, 2.05, 5.12 と変化させたが、Fig. 26(c) に見るように、 $k_{\theta y} = k_{\theta z} = 2.05$ で座屈荷重は剛接合の場合の約 1/2 程度、ピン接合の場合の約 2.5 倍程度になっている。ばね定数がこの値以下では、スナップスルー挙動が明確であり、初期降伏後、直ちに座屈荷重に至っている。 $k_{\theta y} = k_{\theta z} = 5.12$ で座屈荷重は剛接合の場合の 8 割程度であり、座屈時の中央点鉛直変位量は、ほぼ剛接合の場合と同じになっている。ばね定数がこの値以上では、座屈荷重の増加率は漸次、小さくなるものと予想される。回転ばね剛性が座屈荷重に与える影響についての結果は、文献 15) にある等分布荷重の場合の結果と類似した傾向を示している。また、大変形時における部材断面の塑性化に起因して、最大耐力に及ぼす部材断面主軸回りの回転ばねの影響は小さく

なり、無次元化回転ばねの値によらず最大耐力はほぼ等しくなる。その値はピン接合の時の値とさほど変わらず、ピン接合の時の値が下限値となっている。

§5. 結 語

本論文では、ねじ込み接合で組み立てられた単層ラチスドームの座屈実験を行い、実際の挙動を明らかにしたうえで、接合部特性を考慮した弾塑性解析を行い、実験結果との比較検討を行った。さらにこの接合部を考慮した弾塑性解析により、単層ラチスドームの大変形座屈挙動に及ぼす接合部特性の個々の影響を調べた。これより、以下の結論を得た。

- (1) 本研究で製作したねじ込み接合で組み立てられた単層ラチスドームは、部材の降伏が先行し、座屈荷重に至るものの、その座屈挙動は理想的な剛接合単層ラチスドームのそれとは耐力、初期剛性に違いがあり、接合部剛性の影響が大きい。
- (2) 本研究で対象とした中央集中荷重を受ける単層ラチスドームでは、主に曲げ作用により降伏曲面に達する。このように曲げ作用が強く現れる場合には、回転ばね剛性がボール接合単層ラチスドームの座屈荷重に与える影響は大きい。
- (3) 接合部を含む部材曲げ実験による回転ばね剛性を用い、剛域はボールの半径を仮定し、さらにねじの軸方向の緩みを仮定することで、弾塑性座屈解析によりボール接合単層ラチスドームの座屈挙動の予測は十分可能となる。
- (4) 接合部特性のうち、剛域率の増加は座屈荷重をほぼ比例的に増加させるが、最大耐力の差はあまり大きくない。
- (5) 軸方向の緩みの存在は、初期剛性を大きく低下させるものの、座屈荷重にはほとんど影響しない。ただし、スナップスルー挙動が緩やかになるため緩みの幅に伴って、最大耐力は低下する。
- (6) 接合部の回転ばね剛性の内、部材断面主軸回りの

ばね剛性はばね定数が小さい範囲では、単層ラチスドームの座屈挙動に大きく関与するものの、無次元化回転ばね定数 $k_\theta = 5.0$ 程度で座屈荷重は剛接合の場合の 8 割程度を確保できる。最大耐力に関しては、剛接合以外、違いは見られない。

追 記

本研究における数値計算には東京工業大学総合情報処理センターの ETA 10 システムを用いた。

Appendix 接合部曲げ実験

接合部の回転ばね剛性を見積る目的で、文献 19), 22) を参考にボールジョイント接合部を中央を含む部材の繰返し曲げ実験を行った。Fig. A1 中に載荷方法の概略を示す。載荷にはアムスラー型万能試験機を用いた。載荷は、一方向載荷後に部材を 180° 反転させ、逆方向載荷を行い、繰返し載荷とした。試験体を文献 19) と同様にモデル化すると、荷重-部材角関係は次式となる。

$$P = \frac{6}{l_0} \frac{1}{l_0/EI + 3/K_\theta} \theta \quad (\text{A.1})$$

図中に $K_\theta = 200.0, \infty \text{ t}\cdot\text{cm/rad}$ としたときの勾配を示す。解析結果が実験値とほぼ良好な対応を示したときの回転ばね剛性 $K_\theta = 200.0 \text{ t}\cdot\text{cm/rad}$ を用いたときの勾配は、接合部曲げ実験より得られる微小変形時の勾配に一致している。

参考文献

- 1) 鈴木敏郎, 小河利行, 久保寺勲, 石田俊久, 伊藤武司: 単層トラスドームの弾塑性座屈性状に関する研究 (その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 構造 I, pp.1227~1228, 1991 年 9 月
- 2) 鈴木敏郎, 小河利行, 久保寺勲, 石田俊久, 中川健太郎: 単層トラスドームの弾塑性座屈性状に関する研究 (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 構造 I, pp.1229~1230, 1991 年 9 月
- 3) Suzuki, T., Ogawa, T., Kubodera, I. and Ikarashi, K.: Experimental and Theoretical Study of a Single Layer Reticulated Dome, Proc. of the IASS Symp. Copenhagen, Vol. 3, pp.85~92, Sep. 1991
- 4) 鈴木敏郎, 小河利行, 久保寺勲, 五十嵐規矩夫, 石田俊久: 剛接合単層トラスドームの座屈実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 構造 I, pp.1269~1270, 1990 年 10 月
- 5) 鈴木敏郎, 小河利行, 石田俊久, 五十嵐規矩夫: 剛接合単層トラスドームの弾塑性座屈解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 構造 I, pp.1285~1286, 1990 年 10 月
- 6) 半谷裕彦: 単層スペースフレームの構造挙動 (その 1) 単層ドームの座屈荷重評価式, 生産研究, 第 39 巻, 第 12 号, pp.17~20, 1987
- 7) 山田大彦, 石川智章: 単層剛接ラチスドームの座屈に関する理論的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 構造 I, pp.1281~1282, 昭和 62 年 10 月
- 8) 山田大彦, 石川智章: 単層剛接ラチスドームの座屈に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 構造 I, pp.1283~1284, 昭和 62 年 10 月
- 9) 山下哲郎, 國枝治郎: 単層ラチスドームの幾何学的非線

Fig. A1 Bending experiment

- 形解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp. 1213~1214, 1991 年 9 月
- 10) 村上益美: 正六角形平面を有する単層ラチスドームの弾性座屈解析例について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp. 1217~1218, 1991 年 9 月
 - 11) 高島英幸, 加藤史郎: 形状・荷重不整を有する剛接合単層ラチスドームの弾塑性解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 428 号, pp. 89~105, 1991 年 10 月
 - 12) 山本章起久, 有山伸之, 山田大彦: 単層ラチスドームの座屈特性に及ぼす形状初期不整の影響に関する研究, その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp. 1219~1222, 1991 年 9 月
 - 13) 鈴木敏郎, 小河利行, 田中美知, 五十嵐規矩夫: ランダムな形状初期不整を有する剛接合単層トラスドームの弾性座屈解析, 日本建築学会構造系論文報告集, pp. 109~116, 1990 年 12 月
 - 14) 高島英幸, 向山洋一, 加藤史郎: ボールジョイント接合された単層トラス球殻の弾塑性安定解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp. 1285~1286, 昭和 62 年 10 月
 - 15) 山田大彦, 山本博志, 王麗: 単層ラチスドームの変形・応力並びに座屈特性に対する接合部剛性と荷重条件の影響に関する研究, その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 1427~1430, 昭和 63 年 10 月
 - 16) 加藤史郎, 高島英幸: 6 角形平面の剛接合単層ラチスドームの弾塑性座屈解析—形状初期不整が存在しない完全形状ドームについて—, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 408 号, pp. 77~87, 1990 年 2 月
 - 17) 高島英幸, 柴田良一, 加藤史郎, 山田聖志: ねじ込み部分が緩みを有する場合の単層ラチスドームの弾塑性座屈挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 構造 I, pp. 1271~1272, 1990 年 10 月
 - 18) 高島英幸, 加藤史郎: ねじ込み接合の緩み等を考慮した単層ラチスドームの弾塑性座屈荷重に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 構造 I, pp. 1231~1232, 1991 年 9 月
 - 19) 植木隆司, 向山洋一, 床村昌明, 加藤史郎: 単層ラチスドームの載荷試験および弾塑性座屈解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 421 号, pp. 117~128, 1991 年 3 月
 - 20) Meek, J. L. and Longanathan, S: Theoretical and Experimental Investigation of a Shallow Geodesic Dome, Int. J. of Space Structures, Vol. 4, No. 2, pp. 89~105, 1989.
 - 21) 加藤史郎, 山田聖志, 高島英幸, 柴田良一: 剛接合単層ラチスドームの座屈応力度に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 428 号, pp. 97~105, 1991 年 10 月
 - 22) 坂 寿二, 日置興一郎: ねじ込み接合で組み立てた立体トラスの座屈挙動, 日本建築学会論文報告集, 第 331 号, pp. 1~9, 1983 年 9 月
 - 23) 鈴木敏郎, 小河利行: 屋根型円筒トラスシェルの座屈解析, 日本建築学会論文報告集, 第 288 号, pp. 29~37, 1980 年 2 月
 - 24) 鋼構造塑性設計指針, 日本建築学会, 1975

(1992 年 4 月 30 日原稿受理, 1992 年 11 月 12 日採用決定)