緩みのある接合特性を有する単層ラチスドームの 弾塑性挙動シミュレーション法

NUMERICAL SIMULATION METHOD FOR ELASTIC-PLASTIC BUCKLING BEHAVIOURS OF RETICULAR DOME WITH LOOSENESS IN CONNECTIONS

高島 英幸*, 加藤 史郎**

Hideyuki TAKASHIMA and Shiro KATO

In the former study on the numerical simulation for the partial beam with the ball-joint connection, the ability of the numerical modeling was proven by the present authors. By using the similar method, the estimative ability of the present simulation method for the practical latticed dome is investigated through comparative analyses between numerical analyses and experiments.

The numerical analyses are executed with parameters, looseness, initial compressive force at the connectors and initial deflection at noticeable node of the dome. Through comparison between the experiments and the numerical simulations, the structural behaviours of the tested steel single layered latticed domes with ball-joint connections are also precisely discussed

Keywords : *reticular dome, buckling, looseness in connection, numerical simulation, ball joint, elastic-plastic analysis*
単層ラチスドーム, 座屈, 接合部の緩み, 数値シミュレーション, ボールジョイント, 弾塑性解析

1. 序

ボールジョイントを用いて施工される単層状のラチスドームにおいて, その耐力あるいは構造挙動を数値シミュレーションで推定する際, ボールジョイント部分の数値モデル化は避けられない重要な問題の一つである。

著者らは既に文献[1]において, ボールジョイントのある骨組の解析を実行するにあたり, 実用的な解析モデルを提案するとともに, 実物部材の曲げ実験の結果を弾塑性領域にわたってシミュレートできるパラメータを導いている。それによって得られた解析部材モデルを用いて, 本研究では, 実物大6角形平面ドームの載荷試験から得られた弾塑性挙動をシミュレートした結果を報告する。そして, 実験結果とシミュレーションの結果の比較を通して, 本解析モデルによるボール接合単層ラチスドームの弾塑性挙動シミュレーションの有用性を検討する。

単層ラチスドームの弾塑性挙動を実験と解析の両面から分析している研究は, その重要性が指摘されながらも極めて少ないのが現状である。Meekら²⁾は剛接合の球形3方向格子ドームを対象として, 部材断面を微小要素に分割する方法で部材両端の材料非線形性を追跡し, 8スパン(最大スパンを構成する部材の数が8)ドームの載荷実験と弾塑性解析結果の比較を行なっている。その中で, 実験と

解析の差異が生じた理由として, 実験したドームにおいて部材座屈が生じていることを示唆し, 実物ドームの挙動を追跡していく上で, 材料非線形性を考慮することの重要性を説いている。最近の研究では, 藤本ら³⁾が6スパンのボールジョイント型のドームを対象とした実験(中央部の単位ドームに載荷)を数値解析で分析している。材端に剛域とバネを配した弾塑性モデルを用いて比較的精度良いシミュレートを行ない, その有効性を示している。

そのほかにも, ボールジョイントを対象としたものでは, 鈴木らの研究⁴⁾, 植木らの研究^{5), 6)}, 谷口・坂の研究⁷⁾, 剛接合を対象としたものでは, 山田らの研究^{8), 9)}などがあり, 実物あるいは模型実験結果を数値解析で分析している。

一方で, 面内ねじれ剛性が著しく低くなる接合形態に関する考察を述べた半谷らの研究¹⁰⁾や, 実験によってその特性を検討している杉崎・河村の研究¹¹⁾があり, 今後も適材適所的な接合形式の模索とその検討方法の分析が必要になるものと思われる。

2. 対象とするボールジョイント

2. 1 特徴

本論文で扱うボールジョイントは, 前報¹⁾で曲げ挙動をシミュレートしたねじ込み式のもので, ねじ込み時の導入軸力によりボー

*本論文の一部は文献[12]において発表されている。

* 豊橋技術科学大学工学部建設工学系 助手・工博

** 豊橋技術科学大学工学部建設工学系 教授・工博

Research Assoc., Dept. of Architecture & Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture & Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech., Dr. Eng.

ルの表面に部材先端が接触し、曲げ抵抗を発揮できるものである。前報では、導入軸力の大きさでその曲げ抵抗が変化し、導入軸力が規定値以上ないと、ねじ込み時の緩みの影響度が大きくなるが、構造物の耐力を著しく低減させる効果は少ないと予想されることを、例題解析を通して報告した。

2. 2 解析モデル

対象とするボールジョイントの挙動を追跡する有限要素モデル化とその背景等については、既報¹⁾において言及しているので、ここでは簡単に特徴となる所を再録するにとどめる。

実際のボールジョイントと解析モデルの概略図を図-1, 2に示す。接合部分の有限要素はその断面を更にファイバー要素(微小断面を有する繊維の束状)に分割し(図-3参照)、材料非線形性を考慮するために応力-ひずみ関係を図-5の様に仮定される。除荷、再載荷にあたっては図中の点線の履歴をトレースするとしている。

1) コネクタ(注)

図-5 a) はコネクタの応力-ひずみ関係で、初期状態において、ねじ込み部分に存在するであろう緩みをひずみ ϵ_r で表しており、緩みが存在している間の接線剛性は E_r としている。緩みがなくなり、材料が弾性挙動を呈する間の接線剛性は E_e である。また、接合部には初期軸力がノーズを圧縮する形で導入されるため、ノーズに作用する軸力と自己釣り合いが成り立つように引張方向に初期軸力が作用するように配慮されている。その応力は σ_i^0 としている。降伏ひずみは ϵ_y^0 で、降伏後の接線剛性を E_p^0 で表している。

図-1 対象とするボールジョイント

2) ノーズ

ノーズの挙動は図-5 b) の応力-ひずみ関係で仮定している。ノーズ先端がボールに接触している機構を表すために、圧縮域においてのみ応力負担するものとし、そのファイバー要素が引張ひずみ状態になれば、ノーズとボールが離間することを考慮して、応力の負担はないものとする。弾性挙動範囲における接線剛性は E_n で、降伏ひずみは ϵ_y^0 、降伏後の接線剛性は E_p^0 と表示している。更に初期導入軸力による応力 σ_i^0 を配慮する。 σ_i^0 は、ノーズの断面積を A_n 、コネクタの断面積を A_c とすれば、ノーズが受ける圧縮力とコネクタに作用する引張力が釣り合うように、 $-\sigma_i^0 \cdot A_n = \sigma_i^0 \cdot A_c = N_i$ を満たすように設定される。

3) 母材(パイプ部材)

鋼材の材料非線形性として用いられる bi-linear型の応力-ひずみ関係を用いる(図-5 c)参照)。弾性範囲内の接線剛性、降伏ひずみ、降伏後の接線剛性をそれぞれ E_p 、 ϵ_y^0 、 E_p^0 で表している。

なお、採用した各パラメータの値は文献[1]でも用いられたものと同様で、表-1に示すものである。

3. 対象となる単層ラチスドーム

対象とする単層ラチスドームは各々、文献[6]、[5]で実験結果の報告されている六角形平面の全12部材の単位ドームおよび、全42部材の球形4スパンドームである。なお、試験体の接合部には、 $N_i = 4.0tf$ の初期軸力が導入されている。ドームを構成する標準的な部材寸法を図-4に示している。

図-2 接合部の有限要素モデル

図-3 ファイバー要素による接合部断面分割

図-4 ドームを構成する部材

(注) 実際のボールジョイントではボールにもねじ切り溝があり、また、導入軸力のコネクタへの伝達にもさらに複雑なものになると推測される。本来、前報¹⁾の図-2に示すようなモデル化が理想であると考えられる。しかしながら、本解析法では、コネクタは初期状態で、圧縮側、引張側それぞれに d_p の緩みを、ノーズ要素には導入軸力を、仮定することで、その導入軸力の存在でコネクタの引張側の緩みが解消され、さらに変形等で導入軸力が減じられていくと、コネクタの緩みが顕在化されるメカニズムを表現している。その実験挙動との符合は前報で確認されている。

図-5 ファイバー要素に仮定された応力・ひずみ関係

図-6 単位ドームの形状

図-7 4スバンドームの形状

表-1 構成部材の材料定数

material properties	pipe $\phi 139.8 \times 4$	connector $\phi 40$	nose $\phi 85 \times 22.5$
moment of inertia (cm^4)	393.73	11.46	243.67
sectional area (cm^2)	17.07	12.57	44.18
yield stress (tf/cm^2)	3.66	9.94	3.13

表-2 応力-ひずみ関係における諸係数

E_c, E_p	$2,100(\text{tf}/\text{cm}^2)$	E_n	$2,100 \times 0.25(\text{tf}/\text{cm}^2)$
E_r	$210(\text{tf}/\text{cm}^2)$	E_{tc}, E_{tp}, E_{tn}	$21(\text{tf}/\text{cm}^2)$

3. 1 形態について

図-6, 7に有限要素シミュレーションの対象としたドームの形状を示す。単位ドームにおいては数種類の実験が行なわれているが、

中でも弾塑性挙動の影響から、接合部を弾塑性バネで近似したモデルで追従し切れなかったと思われる部材半交角が3度で、パイプ部材の断面が $\phi 140 \times 4$ のもの（文献[6]における試験体 S14-30-3）を選定した。ドームの境界条件はいずれもドーム頂点から放射方向にローラー支持されるものである。

3. 2 実験概要

詳しくは文献[5], [6]に譲り、ここでは、概略を説明するにとどめておく。

H形鋼（単位ドームの場合）あるいはコンクリート（4スバンドームの場合）で作成した支持台の上に鋼板と鋼球を用いてローラー支持を具現化し、その上に試験体を配置し、鉛直下方にドームの1点に載荷するように油圧シリンダをセットする。荷重は油圧シリンダに取り付けたロードセルで、載荷点変位は変位計で測定した。鉛直下向きに試験体の下から、剛性のある棒材で引っ張ることができるため、ドームの最大耐力後も、変位制御で座屈後挙動の追跡が可

図-8 a) 単位ドームの荷重-変位関係 ($N_i = 0.0tf$) 図-8 b) 単位ドームの荷重-変位関係 ($N_i = 4.0tf$)

図-9 初期たわみを考慮した単位ドームの荷重-変位関係

図-10 4スパンドームの荷重-変位関係 ($N_i = 4.0tf$)

能となる。部材の要所にはひずみゲージを貼り付け、発生応力を追跡している。

4. 実験結果とシミュレーション結果の比較・分析

4. 1 シミュレーション方法

部材の曲げ挙動をシミュレートした有限要素モデルについては既報¹⁾において材料パラメータを決定しており、弾塑性挙動に及ぶまで追跡可能であることが確認できている。

本シミュレーションにおいても、同様の部材モデルを用いて、実大単層ラチスドームの弾塑性挙動の追跡に有用であるかを検討していく。パラメータとしては、コネクタの持つ緩み、ドーム頂点への鉛直方向初期不整(単位ドームの場合)を採用し、実験から得られた挙動とシミュレーション結果を比較していく。なお、部材モデル

における諸係数は既に表-1に示した通りである。

4. 2 実験結果とシミュレート結果の比較

4. 2. 1 単位ドームについて

数値シミュレーションは、部材のコネクタの緩み量 d_r ならびに、頂部への鉛直方向初期不整量 w_i をパラメータに実行された。但し、 $d_r = \lambda_2 l_0 \epsilon_r$ である。また、緩み量を変化させた場合の解析は、ねじ込み時の導入軸力が存在しない場合と、 $N_i = 4tf$ の場合で検討を行っている。

図-8は、コネクタの緩み量を、 $d_r = 0.0, 0.01, 0.015, 0.02cm$ とした場合の荷重-変位曲線の推移を表すもので、a) 図が導入軸力 $N_i = 0.0tf$ の場合、b) 図が $N_i = 4.0tf$ の場合の結果である。導入軸力が存在しない場合は、緩みの影響による最大荷重の低減が多少大きくなることが確認できる。これは、a) 図、b) 図を較べて、

表-3 部材応力分布の実験・解析の比較

Stress distributions for unit dome at $P=4.15tf$

axial force(tf)				bending moment($tf \cdot cm$)						
No.	(1)	(2)	(3)	No.	(1)a	(1)b	(2)a	(2)b	(3)a	(3)b
experiment	-9.33	-9.25	9.25	experiment	-25	85	79	-20	26	19
simulation	-9.41	-9.41	9.39	simulation	-29	84	84	-29	29	29

Stress distributions for 4 span dome at $P=4.00tf$

axial force (tf)												
No.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
experiment	-6.38	-8.90	-10.53	-7.58	10.32	-6.38	-8.72	2.31	-1.75	6.12	4.01	3.95
simulation	-6.99	-9.15	-9.56	-7.06	9.47	-6.99	-9.15	2.40	-1.59	6.89	4.45	4.47

bending moment ($tf \cdot cm$)												
No.	(1)a	(1)b	(2)a	(2)b	(3)a	(3)b	(4)a	(4)b	(5)a	(5)b	(6)a	(6)b
experiment	-27	66	-49	67	-25	67	68	-48	24	3	65	-27
simulation	-29	58	-35	55	-26	55	58	-36	26	7	58	-29
No.	(7)a	(7)b	(8)a	(8)b	(9)a	(9)b	(10)a	(10)b	(11)a	(11)b	(12)a	(12)b
experiment	69	-46	15	8	-7	0	16	16	-16	10	-4	-6
simulation	55	-35	14	9	-8	0	29	13	-4	1	-4	-4

緩みが存在しない場合と、 $d_r = 0.01cm$ の場合の最大荷重の変化を観察してみると理解できよう。これは、ボールとノーズの離間の影響が載荷と同時に緩みの寄与を伴って反映されてしまう a) 図の場合と、導入軸力の効果でその離間が抑制されている b) 図との比較からも推察できよう。

しかしながら、いずれの解析においても、座屈耐力後（降伏が進み）の荷重-変位曲線が実験と一致していないことが確認できるが、その理由としては、(1) 実測された試験体ドームの施工時の部材半交角が 3° に及んでいなかったこと、(2) 試験体部材の降伏が稜線部材、周辺部材で各々、対称に進展し得ないこと等、が考えられる。そこで、次に単位ドーム頂点に、初期的なたわみが存在する場合の数値解析を実行した。ドーム頂点に鉛直方向に $w_i = 1$ あるいは、 $2cm$ が存在する場合の解析結果を図-9に示す。この時仮定した緩み量はねじの公差から得られた $d_r = 0.01cm$ である。 $w_i = 2.0cm$ の場合の荷重-変位曲線が実験の座屈後挙動を精度良く追跡できていることがわかる。これらの結果に関する考察は5章で行なう。

4. 2. 2 4スパンドームについて

図-10に、実験より得られた荷重-変位関係とコネクタの緩み量を変化させた数値シミュレーションの結果(但し、 $w_i = 0cm$)を示す。このときの接合部のねじ込みによる導入軸力は、 $N_i = 4tf$ としている。シミュレーションの結果が実験の荷重-変位関係を精度良く追跡できていることが確認できる。最大荷重レベルが最も近い解析結果は、 $d_r = 0.01cm$ の場合であり、本来ねじ込み部分に存在する公差の量と整合する結果となった。

5. 結果の考察と問題点の指摘

表-3には、実験中に測定されたはずみから計算した応力と数値解析から得られた応力の比較を示している。数値解析は、コネクタの緩みが $d_r = 0.01cm$ 、導入軸力が $N_i = 4.0tf$ の下で実行した。但し、単位ドームには頂点に $w_i = 2cm$ の初期たわみを考慮している。なお、各々、載荷に対して応力が線形的に変化している $P = 4.15tf$ (単位ドーム)、 $P = 4.0tf$ (4スパンドーム) 時の計測、計算結果である。実験結果を精度良く追跡できていることが確認できる。

図-11 単位ドームの荷重-変位関係 (含除荷)

図-12 4スパンドームの荷重-変位関係 (含除荷)

5. 1 単位ドームについて

図-9における実験結果と解析結果の比較について、さらに分析を加えておく。実測されたドームの高さは文献[6]にあるように15.1cmであることから、実際の部材半交角は2.88度ということになる。解析においては、部材半交角3°を基準に2cmのギャップをドーム頂点に鉛直方向に与えているが、試験体との差異を見る場合には、実測高さとの差から1.4cm程度のギャップとみなせる。更に、実験では最大荷重点に至る前に繰り返し荷重を行っており、最大耐力に達する前のサイクルで、無荷重状態で0.25cm程度鉛直下方に変形が残っている。従って、この変形量も差し引いて、解析時に与えた実試験体とのギャップの大きさは実質1.15cmと見積れる。このギャップの物理的な意味は、5.3節において考察する。

図-11は、実験で作用させた最大変位から除荷した場合の履歴ループを数値解析で追跡した結果である。除荷時の非線形効果を表すカーブは定性的に追跡できているものの、部材が降伏した後のコネクタ、ノーズの除荷時の実際のメカニズム（離間や緩みの解消など）は解析モデルとの差異がある点も確認できる。

5. 2 4スパンドームについて

試験体が実際に有しているであろうパラメータ、設計導入軸力 $N_i = 4.0\text{tf}$ 、ねじ部分の公差 $d_r = 0.01\text{cm}$ をそのまま採用した解析モデルによって、荷重-変位挙動が精度良く追跡できていることが図-10からわかる。

図-12には、実験で得られた最大変位から除荷した場合の履歴ループを数値解析で追跡した結果を示す。単位ドームの場合と同様、定性的に除荷時の非線形効果が反映されているものの、部材降伏の進展の仕方、除荷時接合部の緩みの解消及び、ボールとノーズの離間メカニズムの実現象としてのばらつき等によると思われる履歴ループ間の差異が存在する。

5. 3 問題点の指摘

文献[1]で設定した解析部材モデルにより、単位ドームならびに4スパンドームを対象として、コネクタの緩み量、初期不整量をパラメータに実物弾塑性実験の荷重-変位関係を追跡したが、こ

では、シミュレーションと実験結果の差異を生み出したと思われる原因を挙げておく。

- (1) 単位ドームの実験挙動は、その構造の単純性ならびに規模を配慮するとき、境界節点の移動の対称性、各接合部の緩み及び導入軸力解消機構の対称性が損なわれた場合に、構造物全休の挙動に与える影響も大きいと予想される。これらの影響が数値解析上の初期たわみ $w_i = 2\text{cm}$ に内包されるものとして考えられる。
- (2) (1)のような事象が発生する要因として、最大荷重を通る荷重-変位曲線を得るまでに部材が降伏しない範囲での繰り返し荷重を行っていることも加えられよう。
- (3) 4スパンドームについては、単位ドームと較べて、同じ六角形平面面積を有する場合の相対的なネットワーク密度が高い（構成部材数が多い）ことから、(1)に挙げた要因に対する敏感性は小さくなっていると考えられる。更に載荷節点が頂点から1つ外側の節点であったことと、その点への集中載荷であったことから、卓越する座屈モードが励起され、載荷時の変形の遷移が比較的理想的（数値解析に近い）であったことが予想される。
- (4) 接合部のモデル化の問題点として、設定した履歴が正確に部材の曲げ履歴を反映できているかどうかを、さらに検討していく必要がある。

6. 結語

本研究では、2つの異なる規模のボール接合された単層ラチスドームの実大実験の挙動を、数値シミュレーションによって追跡した。また、得られた数値シミュレーション結果と実験結果との差異について分析を行ない、その考えられる原因について言及した。その結果から、コネクタの初期緩み量の推定可能性を示唆するとともに、解析部材モデルが設定できれば、当該数値シミュレーション法が、単層ラチスドームの弾塑性実挙動をシミュレートする際に有用であることが確認できた。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、有益な示唆をいただいた(株)巴コーポレーション・久保寺勲博士、同・植木隆司博士へ深く感謝の意を表します。また、比較実験データの使用を了承戴いた向山洋一博士、庄村昌明博士、松榮泰男氏、山田聖志博士にもここで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高島英幸, 柴田良一, 加藤史郎: スペースフレーム接合部の数値シミュレーション法, 日本建築学会構造系論文集, 第455号, pp.105-111, 1994年1月
- 2) Meek, J.L. & Loganathan, S.: GEOMETRIC AND MATERIAL NON-LINEAR BEHAVIOR OF STRUCTURES COMPRISING CIRCULAR AND RECTANGULAR HOLLOW SECTION, Proceedings of I.A.S.S. - 10 YEARS OF PROGRESS IN SHELL AND SPATIAL STRUCTURES -, vol.4, Sep., 1989
- 3) Fujimoto, M., Imai, K. & Saka, T.: Buckling of Single Layer Latticed Dome under Uniform Gravity Load, SPATIAL, LATTICE and TENSION STRUCTURES, Proceedings of the IASS-ASCE International Symposium '94, pp.509-518, Apr., 1994
- 4) 鈴木敏郎, 小河利行, 久保寺勲, 五十嵐規矩夫: ポ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-, 日本建築学会構造系論文報告集, 第444号, pp.53-62, 1993年2月
- 5) 植木隆司, 向山洋一, 庄村昌明, 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
- 6) 植木隆司, 松榮泰男, 加藤史郎, 山田聖志: 単位単層ラチスドームの載荷試験および弾塑性座屈荷重, 日本建築学会構造系論文報告集, 第452号, pp.67-76, 1993年10月
- 7) 谷口与史也, 坂 壽二: わじ込み接合システムトラスの実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第468号, pp.91-99, 1995年2月
- 8) 中村泰教, 本村宏, 山田大彦: 集中荷重と分布荷重を受ける剛接単層ラチスドームの変形特性に関する実験的・理論的研究 -その1 変形特性について-, 日本建築学会学術講演梗概集(東海), 構造 I, pp.1823-1824, 1994年9月
- 9) 本村宏, 中村泰教, 山田大彦: 集中荷重と分布荷重を受ける剛接単層ラチスドームの変形特性に関する実験的・理論的研究 -その2 座屈特性の評価について-, 日本建築学会学術講演梗概集(東海), 構造 I, pp.1825-1826, 1994年9月
- 10) 半谷裕彦, 小田憲史, 西田明美: 単層ラチスシェルの飛移座屈と接合部換れ座屈の相関, 日本建築学会学術講演梗概集(東北), 構造 I, pp.1247-1248, 1991年9月
- 11) Sugizaki, K. & Kohmura, S.: Experimental Study on the Buckling Behavior of a Triodetic Aluminum Space Frame -No.2 Ultimate Bearing Strength of a Single Layer Space Frame-, SPATIAL, LATTICE and TENSION STRUCTURES, Proceedings of the IASS-ASCE International Symposium '94, pp.478-487, Apr., 1994
- 12) Kato, S., Takashima, H., Kubodera, I. & Ueki, T.: Simulation Procedure for Buckling Behaviors of a Reticular Dome, SPATIAL, LATTICE and TENSION STRUCTURES, Proceedings of the IASS-ASCE International Symposium '94, pp.459-467, Apr., 1994

(1996年10月8日原稿受理, 1997年4月4日採用決定)